

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tomi Takkunen  
Jani Karhula

## SUIHKUMOOTTORIN SUUNNITTELU JA VALMISTAMINEN TURBOAHTIMESTA

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2014

**OPINNÄYTETYÖ****Kesäkuu 2014****Kone- ja tuotantotekniikan koulutus-  
ohjelma**Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU  
013 260 600**Tekijä(t)**

Jani Karhula, Tomi Takkunen

**Nimeke**

Suihkumoottorin suunnittelu ja valmistaminen turboahtimesta

**Toimeksiantaja**

Tomi Takkunen, Jani Karhula

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, valmistaa sekä kartoittaa optimointivaihtoehdot auton turboahtimesta valmistetulle Turbojet-malliselle suihkumoottorille. Idea ja pääpiirteittäiset suunnitelmat saatiin netistä. Ensimmäisenä tavoitteena oli toimivan suihkumoottorin valmistus ja sen optimointimahdollisuuksien kartoitus ja niiden mahdollinen soveltaminen. Suihkumoottori suunniteltiin toimimaan dieselpolttoaineella, mutta projektin edetessä siitä jouduttiin luopumaan toteutuksen hankaluuden ja resurssien puutteiden vuoksi. Työn suunnitteluun kerättiin kiitettävä määrä lähdetietoa sekä kirjallisuutta. Työn osien suunnitteluun ja työkuviin tekoon käytettiin Creo parametrics 2.0 3D-suunnitteluohjelmaa.

Opinnäytetyön tuloksena saimme suunniteltua ja valmistettua toimivan, propaanilla käyvän, suihkumoottorin. Suihkumoottori lisälaitteineen kuitenkin painaa enemmän kuin sen tuottama työntövoima ja täten se ei sovellu moottorivaihtoehdoksi. Suihkumoottori saavutti tavoitelämpötilan 788 °C ja meni jopa sen ylikin.

Tulevaisuudessa on syytä kiinnittää enemmän huomiota sopivan turboahtimeen valintaan, riittävien resurssien mitoittamiseen sekä harkita nykyaikaisen aksiaalisen moottorin valmistamista vanhan keskipakoisahdin tyyppisen sijaan. Työn käytännöllinen testausvaihe jäi valitettavan lyhyeksi. Silti työn edetessä molemmat työntekijät saivat laajan ja syvällisen käsityksen suihkumoottorien ja kaasuturbiinien toimintaedellytyksistä sekä periaatteista.

Kieli  
suomiSivuja 61  
Liitteet 2  
Liitesivumäärä 3**Asiasanat**

suihkumoottori, turboahdin, kaasuturbiini, turbojet

**THESIS****June 2014****Degree Programme in Mechanical and  
Production Engineering**

Karjalankatu 3

FI 80200 JOENSUU

FINLAND

013 260 600

**Author(s)**

Jani Karhula, Tomi Takkunen

**Title**

Design and Production of Jet Engine from Turbocharger

**Commissioned by**

Tomi Takkunen, Jani Karhula

**Abstract**

The purpose of this thesis was to design, manufacture, and identify options for an optimization project of a turbojet jet engine being manufactured from old car turbocharger. The broad lines of the idea and plans were taken from the Internet. The primary objective was to manufacture a working jet engine and study its potentials for optimizing and mapping the application possibilities. The jet engine was designed to run on diesel fuel but, as the project progressed, this had to be discarded due to the implementation problems and lack of resources.

Fair amounts of references, work plans and literature were collected for this study. Creo Parametrics 2.0 3D design software was used for the part design and technical drawings. As a result, a propane used jet engine was manufactured. The jet engine with all the necessary accessories weighs more than it produces thrust, and thus is not suitable as an alternative for the motor. The goal temperature of 788°C was reached and the temperature rose even further.

It must be concluded that the practical phase of the testing period was disappointingly short. As the work progressed, however, both employees gained extensive and in-depth understanding of jet engines and gas turbines operating conditions, as well as their principles. In the future, it is necessary to pay more attention to the selection of suitable turbochargers, available resources as well as to consider the usage of a modern axial motor rather than an old centrifugal charger.

**Language**

Finnish

**Pages 61**

Appendices 2

Pages of Appendices 3

**Keywords**

jet engine, turbocharger, gas turbine, turbojet

# Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	6
1.1	Esittely .....	6
1.2	Toimintaperiaate .....	7
1.3	Tavoitteet.....	9
2	Suihkumoottorin teoria.....	10
2.1	Turbo .....	10
2.1.1	Turbon Teoria.....	12
2.1.2	Voitelu.....	14
2.2	Palokammio .....	15
2.2.1	Materiaalit .....	16
2.3	Liekkiputki .....	16
2.3.1	Materiaalit .....	17
2.4	Jälkipoltin.....	18
2.5	Polttoainejärjestelmä .....	19
2.5.1	Pumppu .....	19
2.5.2	Suutin .....	20
2.6	Polttoaine .....	20
2.6.1	Polttoaineen kulutuksen laskeminen .....	21
2.7	Sytytyspiiri .....	23
3	Suihkumoottorin suunnittelu .....	25
3.1	Turboahdin .....	25
3.2	Liekkiputki .....	26
3.3	Palokammio .....	29
3.4	Suihkuputki- ja suutin .....	31
3.5	Palokartio .....	31
3.6	Kiinnityslaipat .....	33
3.7	Suihkumoottorin kokoonpano ja testialusta .....	36
3.8	Valmistuskuvat laserleikkurille.....	37
3.9	Vaihtoehdot .....	39
3.10	Turvallisuussuunnitelma .....	40
3.11	Öljy- ja polttoainejärjestelmä.....	41
4	Rakentaminen .....	42
4.1	Osat ja hitsaus .....	42
4.2	Palokammio ja liekkiputki .....	43
4.3	Suihkuputki .....	47
4.4	Testialusta ja kokoonpano.....	48
5	Mittaukset ja testitulokset.....	50
5.1	Anturointi .....	50
5.2	Testaus ja testitulokset .....	51
6	Parannusehdotukset .....	54
6.1	Vesisuihkutus .....	54
6.2	Kellomainen ilmanotto.....	54
6.3	Korkeapainepumppu .....	56
6.4	Ohivirtaus .....	56
7	Pohdinta.....	57
7.1	Työn eteneminen .....	57
7.2	Kehitysideat.....	58

7.3	Ammatillinen kasvaminen työn edetessä .....	58
Lähteet.....		60

#### Liitteet

Liite 1	Koottu Arduino-järjestelmä antureille
Liite 2	Riskienarviointilomake

# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä yhdistyvät suuressa määrin lähes kaikki neljän opiskeluvuoden aikana opetetut aiheet. Suihkumoottorin tuottama lämpö toi esille materiaalitekniset haasteet, kun taas öljyn ja polttoaineen kierto, sekä syöttö kohteeseen pakottivat kertaamaan hydraulikkaa ja fysiikkaa. Moottorin käynnistykseen ja sytytykseen piti valmistaa siihen sopivat virtapiirit. Jotta moottoria pystyi ajamaan turvallisesti, oli aiheellista kartoittaa ja soveltaa anturointitekniikkaa. Lisäksi yhdelle tietotekniikan opiskelijalle annettiin tehtäväksi hoitaa mittausdatan sähköistäminen ja tiedonkeruu.

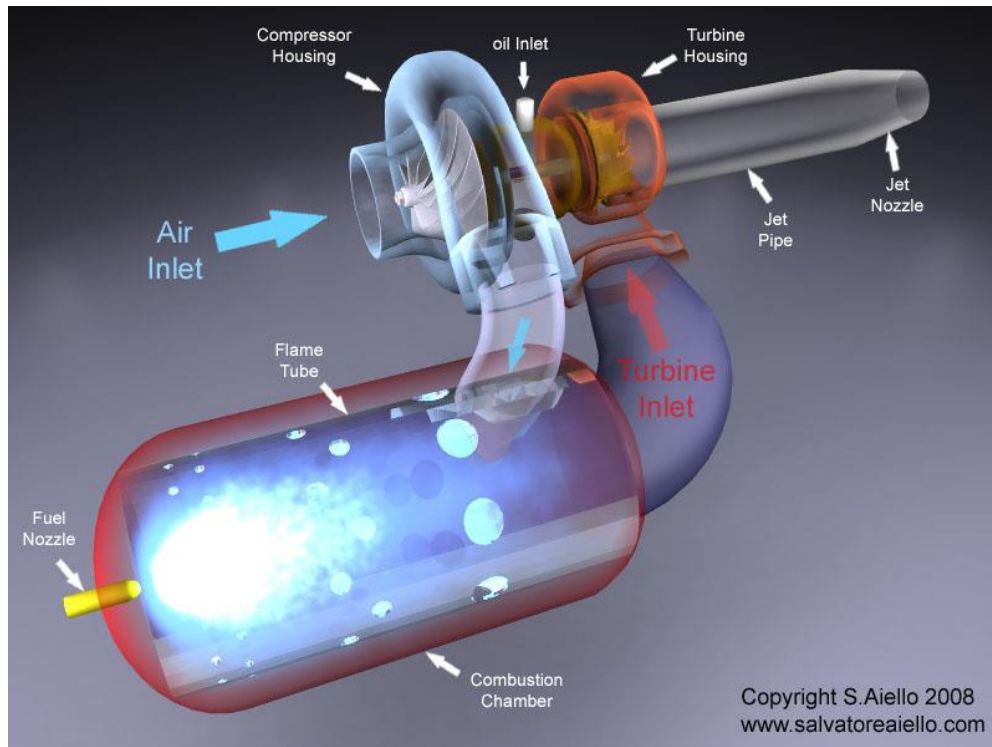
## 1.1 Esittely

Opinnäytetyönä suunniteltiin ja valmistettiin Turbojet -tyyppinen suihkumoottori vanhasta turboahtimesta. Turboahtimena toimi vanha 6 litran Volvo F86 -dieselmoottorista saatu Holset 3LD9/2.24 turbo.

Erilaisia suihkumoottoreita on vuosien varrella esitelty lukemattomia määriä 1940-luvulta lähtien. Opinnäytetyössä käytettävä Turbojet-tyyppinen moottori on eräänlainen variaatio ensimmäisistä käyttöönotetuista suihkumoottoreista. Perinteisen polttomoottorin sijaan hyödynnetään modernin turboahtimen rakennetta, joka oikeassa käyttötarkoituksessaan autossa ahtaa ilmaa. Suihkumoottorin toimintaprosessin palo- ja työntövaiheet lisättynä se toimii kuten perinteinen nelitahtimoottori sillä erotuksella, että kaikki vaiheet ovat käynnissä samanaikaisesti.

## 1.2 Toimintaperiaate

Valmistettavan Turbojet-suihkumoottorin toimintaperiaate on seuraava: käynnistyksen jälkeen kompressorin puoli imee ilmaa ja toimittaa sen imukanavaa pitkin palokammioon. Palokammio sijaitsee imu- ja pakopuolen välissä ja toimii polttoaineen ja ilman seostus- ja sytytyskohteena (kuva 1).



Kuva 1. Turbosta valmistetun Turbojet-suihkumoottorin periaatekuva (Aiello 2008).

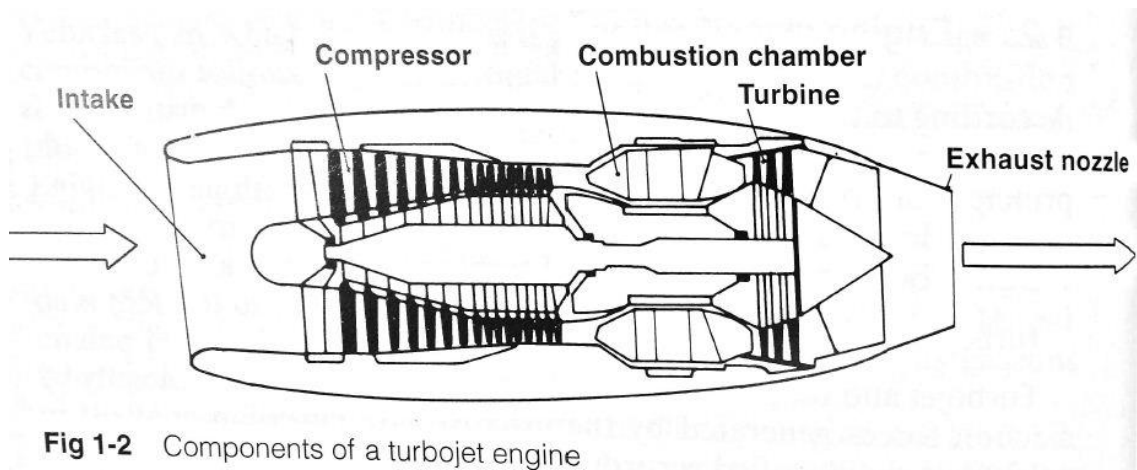
Taulukko 1. Kuvan 1 selitteiden käännökset.

*Air Inlet – Kompressorin imuaukko	*Oil Inlet – Öljyn sisääntulo
*Turbine Housing – Turbiinin kotelo	*Turbine Inlet – Turbiinin sisääntulo
*Fuel Nozzle – Polttoainesuutin	*Compressor Housing – Kompressorin kotelo
*Jet Pipe – Suihkuputki	*Jet Nozzle – Suihkusuutin
*Combustion Chamber – Palokammio	*Flame Tube – Liekkiputki

Palokammion sisällä on liekkiputki, johon on työstetty reikiä, jotka suurenevat palokammion pakopuolta lähestyessä. Reiät on tehty kahdesta syystä. Ensimmäiseksi ne annostelevat ja toimittavat oikean määrän ilmaa sekoitettavaksi polttoaineen kanssa. Toiseksi ne hidastavat lähes 150 m/s nopeudella virtaavaa ilmaa. Jotta ilma-polttoaineseos voisi syttyä, ilman nopeuden on oltava noin 18 m/s tai sen alle. (Koivisto & Jokinen 2008, 146; Hünecke 2012, 125.)

Polttoaine ruiskutetaan pumpulla korkeapainesuuttimen läpi ja sytytetään yhdellä tai useammalla sytytystulpalla. Koko käynnissäolon ajan turboahtimen läpi pumpataan voitelevaa ja viilentävää öljyä. Koska turbon akselin lämpötila voi kohota jopa yli 500 °C, on asiallinen ja riittävä öljyn jäähdytys ja sen säiliöinti tarpeellista. Palokammioista palava seos virtaa turbon pakopuolen putkiston kautta turbiiniin samalla tuottaen työntövoimaa.

Työntövoima perustuu Newtonin mekaniikan kolmeen lakiin. Työntövoima muodostuu, kun suihkumoottorin sisään tulevan massavirran ja nopeuden tulosta vähennetään moottorista purkautuvan massavirran ja nopeuden tulo ajan suhteen (Benson 2010). Massavirran nopeuden muutoksen saa aikaan palokammiossa palava polttoaineseos.



Kuva 2. Kaupallisen Turbojet suihkumoottorin poikkileikkaus (Hünecke 2012).

Verrattaessa nelitahtimoottoriin, suihkumoottorissa palotapahtuman toimintavaiheet ovat käynnissä samanaikaisesti moottorin eri osissa seuraavasti (kuva 2):



- \*Imuvaihe – Ilmanotto-osa/ahdin
- \*Puristus – Ahdin
- \*Palaminen – palokammio, energia lisäys
- \*Työ- ja poistovaihe – turbiini ja suihkuputki

### **1.3 Tavoitteet**

Tavoitteena ensisijaisesti oli suunnitella toimiva suihkumoottori ja valmistaa se suunnitelman pohjalta sekä pintapuolisesti esittää eri optimointimahdollisuuksia työntövoiman lisäämiseksi erilaisin rakenteellisin muutoksin. Suihkumoottorin toiminnan tavoitteeksi asetettiin vakaa tyhjäkäynti sekä mahdollisuus ajaa moottoria täydellä kaasulla.

## 2 Suihkumoottorin teoria

Tässä osiossa käydään osakohtaisesti läpi suihkumoottorin eri osien taustateoria ja niiden merkitys valmistettavaan suihkumoottoriin. Lisäksi jokainen suihkumoottorin osa suunniteltiin sopivaksi ja 3D-mallinnettiin kyseinen kappale Creo Parametrics -ohjelmalla. Mitoitusapuna käytettiin hyvin paljon JetSpecs™ Designer 2.0 -suunnitteluohjelmaa ja ohjelman tekijältä saatua suunnitteluaineistoa (Shelly 2014).

### 2.1 Turbo

Turboahdin (kuva 3) on käytännössä pakokaasukäyttöinen ilmakompressor. Palanut ilman ja polttoaineen seos muuttuu pakokaasuksi ja pyörittää turbiinipuolen siipiä. Turbiinipuolen siivet on yhdistetty akselilla kompressoripuolen siipiin ja ne pyörivät samalla nopeudella turbiinin kanssa. Kompressoripuolen siivet imevät lisää ilmaa ja puristavat sen kompressorikotelossa. Turboahtimen tehonlisäys perustuu siihen, että mitä enemmän palavaa, kokoonpuristettua ilman ja polttoaineen seosta mahtuu palokammioon, sitä voimakkaammin palava seos työntää mäntää alaspäin (Mauno 1998, 149.)



Kuva 3. Turbon poikkileikkaus (Hämäläinen 2003).

Suihkumoottorin perustaa varten selvitettiin mahdollisia paikkoja, josta voisi hankkia turboahtimen. Joensuusta löytyi lopulta FIN-Turbo Oy:ltä vanha Holsetin 3LD9/2.24-turboahdin. Turbo on suihkumoottorin keskeisin osa, sillä sen koon perusteella osataan rakentaa sopivan kokoinen palokammio ja muut osat suihkumoottoriin. Kyseisessä turboahtimessa on 53,3 mm:n imuaukko ja 63 mm:n pakoaukko.

Kuten polttomoottorin tapauksessakin, myös Turbojetissä ilman ja polttoaineen massa-virtaa kasvattamalla saadaan lisää työntövoimaa. Yleisesti suihkumoottoreissa on käytetty kahta erimallista ahdintyyppiä. Ensimmäinen on aksiaalinen ahdin, joita käytetään moderneissa lentokoneissa. Tämän tyyppisissä ahtimissa ilmavirtaus toimitetaan pitkittäin akselinmukaisesti.

Toinen käytetyistä tyypeistä on keskipakoisahdin, jollaista käytetään myös tässä Turbojet-suihkumoottorissa. Tämän tyyppinen ahdintyyppi on käytössä olevista ahtimista vanhin. Monissa pienissä moottoreissa nykyisinkin käytetään keskipakoisahdinta joko yksin tai yhdistettynä aksiaalisen ahdintyyppin kanssa.

Ilma virtaa ahdinpyörälle sen akselin suuntaisen siivistön kautta, josta se kääntyy säteen suuntaiseksi ja ulkokehälle säteittäisten siipien muodostamien aukkojen kautta. Kun ilma lähestyy ahdinpyörän ulkokehää, sen nopeus kiihtyy siipien muodostamissa kanavissa.

Ulkokehältä ilma virtaa ahdinpyörää ympäröivälle paikallaan olevalle siivistölle, eli diffusorille. Diffusorissa virtaussuuntaan laajenevat ohjaussiivekkeet ohjaavat ilmavirran oikeaan suuntaan jakoputkistoon sekä muuttavat osan ilman nopeusenergiasta paine-energiaksi. Jakoputkistosta ilma voidaan toimittaa seuraavalle ahdinvyöhykkeelle, kokoojakammioon tai palokammion. Yleinen käytäntö on, että puolet halutusta paineen noususta tapahtuu ahdinpyörällä ja puolet diffusorilla. (Koivisto & Jokinen 2008, 106.)

### **Keskipakoisahtimen hyviä ominaisuuksia:**

- \* Suuri paineen nousu yhdessä vyöhykkeessä
- \* Hyvä paineennostokyky laajalla nopeusalueella
- \* Yksinkertainen ja halpa rakenne

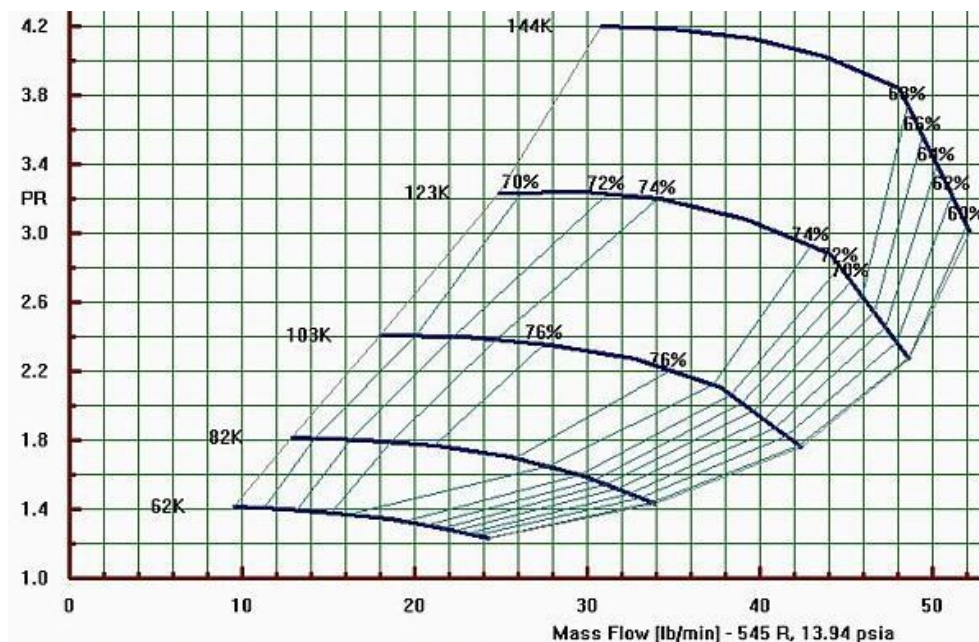
- \* Alhainen paino tehoon nähden
- \* Pieni käynnistystehon tarve

### Keskipakoisahtimen huonoja ominaisuuksia:

- \* Suuri otsapinta
- \* Useamman kuin kahden vyöhykkeen käyttö on epäedullista

#### 2.1.1 Turbon Teoria

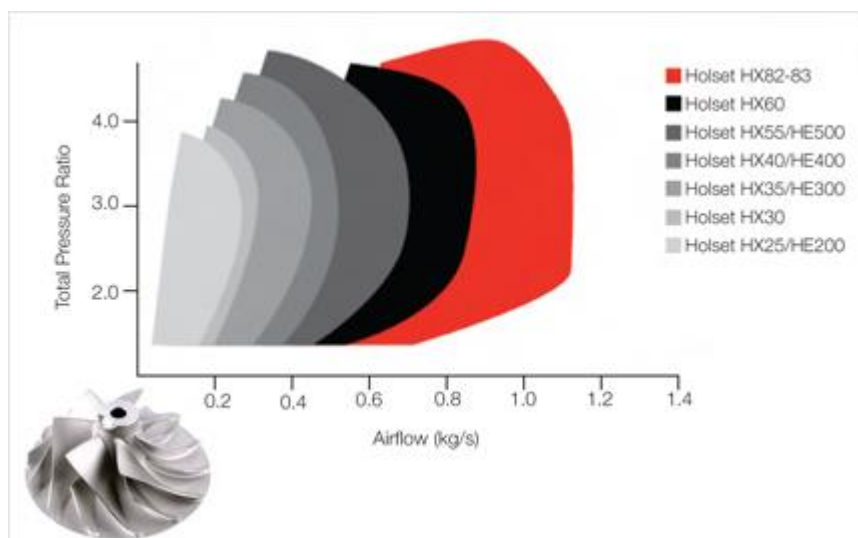
Painesuhde  $Pr$  on yksi oleellisimmista asioista suihkumootoria suunniteltaessa. Painesuhde määritellään kaavasta  $Pr = (Bp + Ap) / Ap$ , jossa  $Pr$  on painesuhde,  $Bp$  on turbon ahtopaine ja  $Ap$  on ilmanpaine (Mauno 1998, 148). Turbon kompressorikarttaa (kuvio 1) tutkimalla voidaan havaita, että turbo toimii parhaalla hyötysuhteella painesuhteen ollessa noin 2. Tämä vaihtelee turbosta riippuen, mutta jokaisen turbon kompressorikartassa on havaittavissa ”saareke”, jossa hyötysuhde on korkeimmillaan.



Kuvio 1. Kompressorikartta jossa on painesuhde massavirran suhteen. Turbin hyötysuhde on ilmaistu prosentteina. 62K:sta 144K:hon ovat turbin kierroslukuja, jossa K tarkoittaa 1000:n kerrointa. (HybridZ 2007).

Tämä tarkoittaa sitä, että painesuhteen ollessa 2 ja ilmanpaineen ollessa 1 bar, ahtopaineeksi  $B_p$  saadaan  $2 * 1 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = 1 \text{ bar}$ . Kun suihkumoottoria testataan, voidaan painemittarista seurata turbon toimintaa optimaalisella alueella.

Toinen tärkeä tieto, mikä saadaan kompressorikartasta (kuva 4), on kompressorin virtaavan ilman määrä. Yleensä yksikkönä on paunaa minuutissa tai kiloa sekunnissa. Ilmamäärän avulla lasketaan arvio polttoaineen kulutukselle, suihkumoottorin toimiessa täydellä teholla. Käytännössä suihkumoottorin optimaalinen toiminta varmistetaan seuraamalla ahtopainetta, turbon kierrosnopeutta ja pakokaasun lämpötilaa.



Kuva 4. Erikokoisten turbojen kompressorikarttoja (Cummins turbo technologies 2014).

Suihkumoottoriin tuleva turboahdin oli niin vanha, että siihen ei löytynyt kompressorikarttaa. Valmistajakaan ei vastannut lukuisista yhteydenotoista huolimatta. Koska kompressorikarttaa käytetään vain suuntaa antavan ilmamäärän ilmaisemiseen, päätettiin käyttää suunnilleen samankokoisien turboahdimien karttoja. Tämän lisäksi JetSpecs-ohjelma osaa arvioida turbon läpi kulkevan ilmamäärän.

Suihkumoottorien toimintaa rajoittaa turbiinin siipien lämmönkesto. Harrastelijat ovat käyttäneet suihkumoottoreissaan lämpötilarajana ennen turbiinia  $788\text{ °C}$ , jonka jälkeen on vaarana siipien sulaminen. Toisena rajana on pidetty n.  $650\text{ °C}$  turbiinin jälkeen. Tässä työssä pyritään pääsemään mahdollisimman lähelle näitä lämpötiloja.

### 2.1.2 Voitelu

Turboahtimen akselin pyöriessä jopa yli 100 000 kierrosta minuutissa on tärkeää huolehtia laakerien voitelusta. Turbossa käytetään näihin suuriin nopeuksiin tarkoitettuja liukulaakereita kitkan vähentämiseksi. Liukulaakereissa pyörivän akselin ja laakerin väliin jää ohut öljykerros, joka estää metallipintojen kosketuksen keskenään. Turbon siipien takia akseliin kohdistuu myös akselin suuntaista voimaa, jota varten täytyy olla oma laakerinsa. Öljynpaineen täytyy olla noin 2 - 4 bar riittävän voitelun takaamiseksi. (BorgWarner 2014.)

Voitelun kannalta öljyn optimaalinen lämpötila on 90 - 100 °C. Alle 50 °C turboa ei saisi käyttää liian korkeilla kierroksilla, koska öljyn viskositeetti ei ole tarpeeksi pieni. Öljylinjastoon voidaan asentaa öljynjäähdytin, mutta silloin täytyy huolehtia, ettei se jäähdytä öljyn lämpötilaa liian alhaiseksi. Öljynsuodattimen tehtävä on poistaa epäpuhtaudet öljystä ja niiden päätyminen liikkuvien osien väliin. (Mauno 1998, 192 - 194.)

Voiteluöljylle tarvitaan sopiva metallinen säiliö, josta öljy pumpataan turbon läpi ja takaisin. Tähän tarkoitukseen käy esimerkiksi 10 - 20 litran metalliset polttoainekanisterit. Säiliön tilavuus on hyvä olla jäähdytyksen kannalta, 2 - 3 kertaa suurempi kuin käytettävänä olevan öljyn tilavuus. Säiliön tulisi olla suljettava epäpuhtauksien välttämiseksi. Jäähdytykseen vaikuttaa säiliön pinta-alan lisäksi öljyputkien pinta-ala ja materiaali. Turbon läheisyydessä suositellaan käytettäväksi kupari- tai alumiiniputkea kuumuuden vuoksi. Kauempana turbosta voidaan käyttää kumiletkeä jolloin öljysäiliötä voidaan liikuttaa.

Öljyputkessa olevan paineen vuoksi liitokset täytyy tarkistaa huolellisesti ja painetta tarkkailtava painemittarilla. Säiliössä olevan öljyn lämpötilaa täytyy tarkkailla jatkuvasti, jotta tiedetään öljyn voitelun olevan optimaalisella alueella.

## 2.2 Palokammio

Palokammio (kuva 5) on tila, jossa palaminen tapahtuu ja jossa optimaalinen polttoaine-ilmaseos voi muodostua. Palokammio on lieriömäinen putki, jonka sisällä sijaitsee erikokoisilla ilma-aukoilla varustettu yksi tai useampi liekkiputki. Tässä tapauksessa käytetään vain yhtä palokammiota sekä yhtä liekkiputkea.

”Palokammioalueen vaatimuksista voidaan mainita seuraavat tekijät: tehokas palaminen moottorin koko toiminta-alueella, vähäinen paineen putoaminen, hyvä lämpötilan nostokyky, oikeanmuotoinen purkautuvien kaasujen lämpötilaprofiili, hyvät uudelleensyttymisominaisuudet lennolla ja mahdollisimman pienet saastepäästöt” (Koivisto & Jokinen 2008, 142).

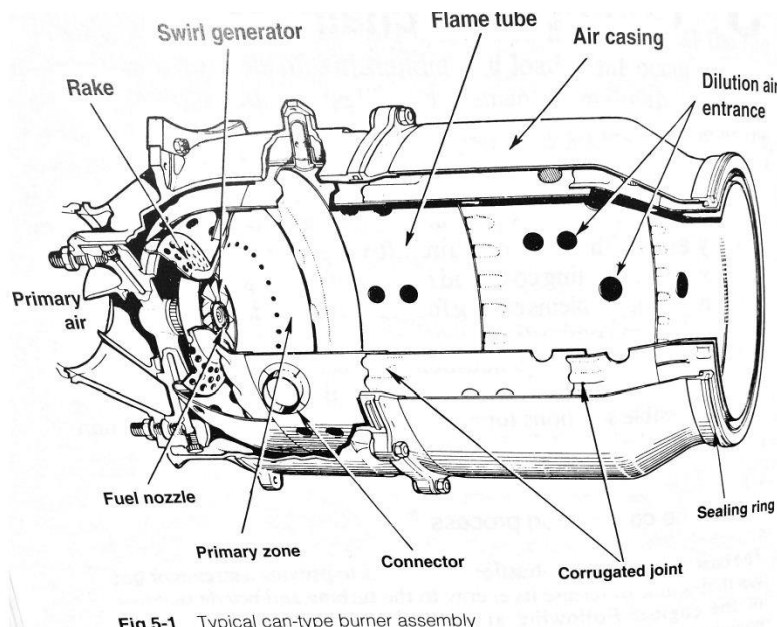


Fig 5-1 Typical can-type burner assembly

Kuva 5. Palokammion komponentit (Hünecke 2012).

Taulukko 2. Kuvan 5 käsitteet käännettynä.

<b><i>Primary Air</i></b>	Pääilma	<b><i>Dilution air entrance</i></b>	Sekoittumisvyöhyke
<b><i>Rake</i></b>	Harava	<b><i>Sealing ring</i></b>	Tiiviste rengas
<b><i>Swirl generator</i></b>	Pyörteyttäjä	<b><i>Corrugated joint</i></b>	Aallotettu liitos
<b><i>Flame tube</i></b>	Liekiputki	<b><i>Connector</i></b>	Liitin
<b><i>Fuel zone</i></b>	Polttoaine suutin	<b><i>Primary Zone</i></b>	Primäärivyöhyke
<b><i>Air casing</i></b>	Palokammio		

### 2.2.1 Materiaalit

Koska laitteessa on käynnissä jatkuva paloreaktio, täytyi tarkastella palokammiossa käytettävien materiaalien lämmönkestoja ja käyttäytymistä kovan kuumuuden alla. Palokammioista seuraava vaihe on turbiini. Jos lämpötilan johdosta irronnut teräshilse ajautuu 100 000 rpm pyörivään turbiinin siipeen, voi mittava vahinko olla mahdollista.

Palokammioon valittiin materiaaliksi austeniittinen ruostumaton teräs, sillä se soveltui lämpö- ja mekaanisilta ominaisuuksiltaan kyseiseen käyttötarkoitukseen hyvin. Vaikka lämpötila palokammiossa voi nousta helposti yli 600 °C, se on vain hetkellistä, noin 5 - 10 min kestoista, johtuen lyhyistä käyntioloajoista. Lisäksi sisään virtaavan ilman muodostama vaippa suojaa palokammion ja liekkiputken pintoja.

### 2.3 Liekkiputki

Kompressorilta ilma toimitetaan palokammioon, jossa palaminen tapahtuu liekkiputkessa. Liekkiputki voidaan jakaa tilavuudeltaan kolmeen melkein yhtä suureen alueeseen, joilla on omat tehtävänsä. Ensimmäinen osio on palamisalue eli palamisvyöhyke. Tällä vyöhykkeellä polttoaine-ilmaseos palaa lähes optimaalisella seossuhteella. Tämän jälkeen seuraa sekoittumisen ja laimentumisen vyöhyke, jossa palokammion ulkoreunoilla virtaava viileämpi ilma sekoittuu palamiskaasuihin liekkiputkessa sijaitsevien reikien kautta. Tämän jälkeen muodostunut kaasuseos virtaa turbiinille.

Jotta polttoaine sekoittuisi ilman kanssa tehokkaasti, täytyy ilman nopeuden olla sopiva liekkiputkeen tultaessa. Polttoainetta hienojakoiseksi sumuksi suihkutettaessa pienempikin ilman nopeus riittää luomaan hyvin syttyvän seoksen. Sekoittumaton polttoaine putoaa palokammion pohjalle ja voi aiheuttaa räjähdysvaaran seuraavalla käynnistyskerralla. (Mauno 1998, 15, 94.)

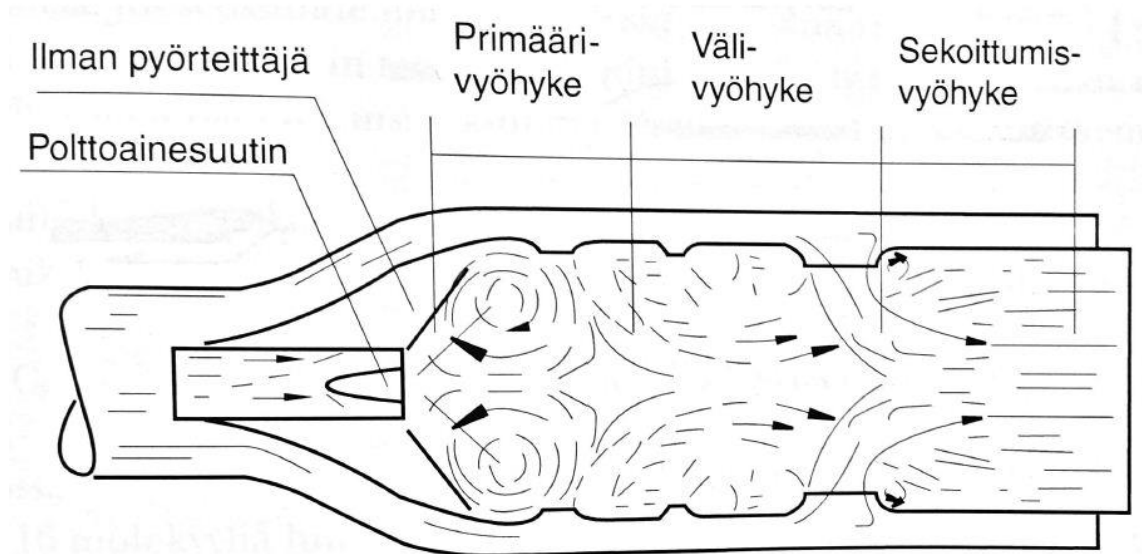
Kompressoripuolelta virtaavan ilman virtausnopeus on liian suuri palamistapahtuman käynnistämiseksi (100 - 150 m/s) ja tämän takia sen nopeutta on hidastettava. Yleisin tapa on sijoittaa pyörteyttäjä, staattisesti paikallaan olevat siivekkeet liekkiputken suul-



le, joiden läpi osa ilmasta virtaa muuttaen sen turbulenttiseksi ja hidastaen sitä huomattavasti.

Pyörteyttäjän läpi (kuva 6) virtaa noin 25 % palokammioon toimitetusta ilmasta. Tähän ilma- massa ruiskutetaan käytettävä polttoaine. Polttoainepisarat höyrystyvät ja sekoittuvat ilman kanssa muodostaen kaasuseoksen. Tämä seos sytytetään sytytystulpalla käynnistysvaiheessa. Palamisreaktion käynnistyttyä sytytystulppaa ei enää tarvita. Loput 75 % ilmasta pääsee virtaamaan liekiputken sisään palotapahtumaan liekiputken seinämän kautta, muodostaen vaipan liekin ja putken seinämän välille. Tämä ilmavaippa erottaa liekin kontaktin liekiputken seinämään. (Koivisto & Jokinen 2008, 146, 147.)

“Noin 25 % palokammioon tulevasta ilmasta sekoittuu prosessiin primaarivyöhykkeessä. Toinen 25 % sekoittuu välivyöhykkeellä ja loput 50 % sekoittuu sekoittumisvyöhykkeellä.” (Koivisto & Jokinen 2008, 147.)



Kuva 6. Palokammion sekoittumisvyöhykkeet (Koivisto & Jokinen 2008).

### 2.3.1 Materiaalit

Liekiputken materiaalina käytettiin samaa austeniittista ruostumatonta terästä kuin palokammiossa. Materiaalivalinnassa täytyi ottaa huomioon liekiputken lämpölaajeneminen ja materiaalin kova kuluminen reikien kohdalta. Teräkseksi saatiin Finelcomp

Oy:n toimesta austeniittinen, tasapainotettu, hyvät muovaus- ja hitsausominaisuudet omaava C-ALSI 304, lisäksi se kestää erinomaisesti korroosiota.

## 2.4 Jälkipoltin

Koska turbiinilta virtaavassa kaasuseoksessa on jäljellä palamatonta happea, on työntövoiman lisäys polttoainetta siihen ruiskuttamalla mahdollista. Jälkipolttimella (kuva 7) saadaan 50 % - 100 % työntövoiman nousu mutta se lisää polttoaineen kulutusta 100 % - 200 %.

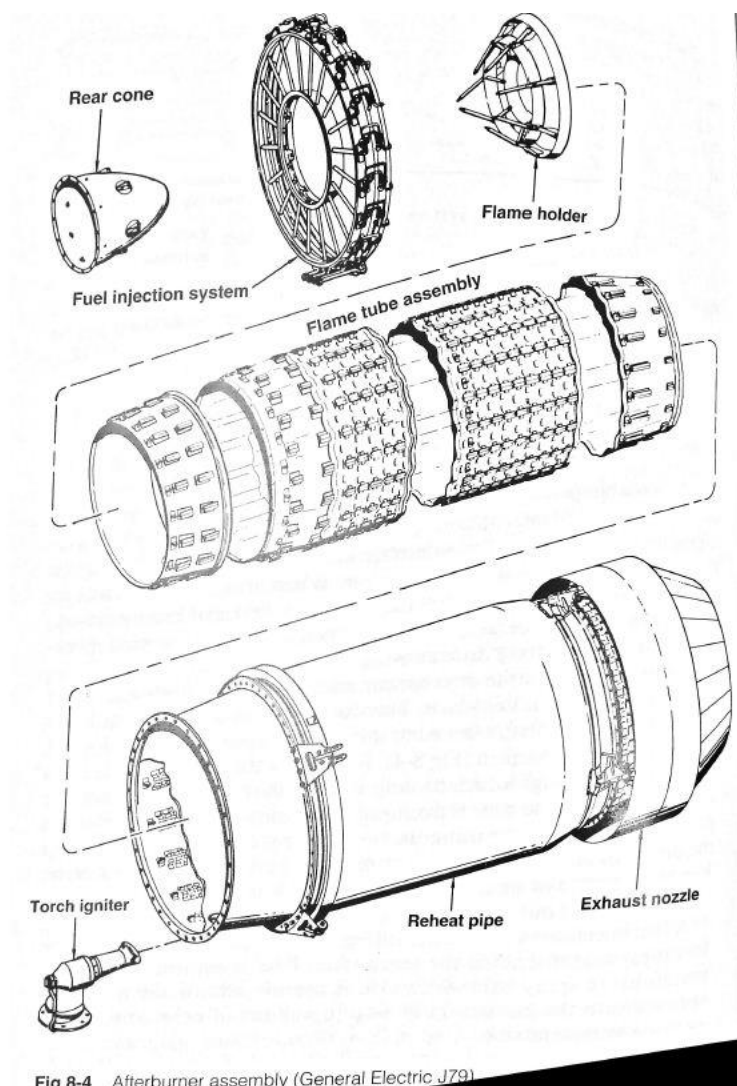


Fig 8-4 Afterburner assembly (General Electric J79)

Kuva 7. Kaupallisen jälkipolttimen räjäytyskuva (Hünecke 2012).

Taulukko 3. Kuvan 7 käsitteet käännettynä.

<b><i>Rear cone</i></b>	Peräkartio	<b><i>Reheat pipe</i></b>	Uudelleenlämmitysputki
<b><i>Flame holder</i></b>	Liekinpidin	<b><i>Exhaust nozzle</i></b>	Pakosuutin
<b><i>Flame tube assembly</i></b>	Liekkiputken kokoonpano	<b><i>Torch igniter</i></b>	Soihtusytytin

Jälkipoltin (kuva 7) muodostuu perinteisesti 4 osasta: liekinpitimestä, polttoaineen ruiskutusjärjestelmästä, liekkiputkesta sekä muuttuvageometrisesta pakosuuttimesta eli augmenttorista. Jälkipoltin sijaitsee heti turbiinivaiheen jälkeen. Turbon geometrisen muodon takia ei varsinaisen virtauksen lisäksi palotapahtuman ohi tulevaa ohivirtausta saada. Osana jälkipolttimen rakennelmaa voidaan pitää myös peräkartiota, jonka tarkoituksena on täyttää turbiinin akselinpään luoma tyhjä tila ja täten estää liekin romahtaminen sen luomaan sektioon jossa virtausta ei ole. Toiseksi se ohjaa ilmavirtaa täyttämään koko jälkipolttimen poikkipinta-alan. (Hünecke 2012, 175.)

## 2.5 Polttoainejärjestelmä

Kaupallisissa sovelluksissa polttoaine pumpataan kolmessa vaiheessa, joista ensimmäisessä polttoaine toimitetaan eteenpäin matalassa, noin 1–2,5 bar paineessa polttoainesäiliöstä. Polttoaine suodatetaan ja sen virtausnopeus mitataan, jonka jälkeen se virtaa varsinaiseen moottorin polttoainejärjestelmään. Tasaisen suihkutuksen takaamiseksi polttoaineen paine nostetaan matalapainepumpulla ensin 7 bar paineeseen. Tämän jälkeen se esilämmitetään ja suodatetaan uudelleen korkeapainesuodattimella. Viimeisessä vaiheessa polttoaineen paine nostetaan 80 bar paineeseen ennen toimitusta polttoaineen hallintajärjestelmään, josta se jaetaan suuttimille. (Hünecke 2012, 186.)

### 2.5.1 Pumppu

Nykyajan suihkumoottoreissa tarvitaan useiden kymmenien baarien suihkutuspaine, jotta saavutettaisiin tyydyttävä polttoaineen atomisaatio. Ei-kaupallisiin suihkumoottoreihin ei kumminkaan ole mahdollista käyttää näin suuria korkeapainepumppuja. Jos

Turbojet-suihkumoottoria käytetään nestemäisellä polttoaineella, olisivat hammasratas-pumput erinomainen valinta niiden edullisuuden, tasaisen tuoton ja riittävän paineen-tuottokyvyn takia. Propaania käytettäessä ei tarvita pumppua, koska propaani kaasuun-tuu itsekseen. Propaanisäiliöön tarvitaan kuitenkin korkeapaineventtiili riittävän korke-an virtauksen aikaansaamiseksi.

### 2.5.2 Suutin

Propaanilla ajettaessa riittää suuttimeksi mikä tahansa päästään tulpattu teräsputki. Putki voidaan kiinnittää palokammioon hitsaamalla tai tekemällä putkeen ja palokammioon kierteet. Putkessa tulee olla säteensuuntaisesti porattuja reikiä kaasun sekoittumisen takaamiseksi. Nestemäisiä polttoaineita käyttäessä on kiinteistöjen öljylämmitysjärjes-telmissä käytettävä kattilasuutin erinomainen valinta. Kiinteistölämmitinjärjestelmien suuttimet tarjoavat tarvittavan kapasiteetin, paineen ja käypäisen ruiskutuskulman sekä ne ovat verrattain edullisia.

## 2.6 Polttoaine

Polttoaineena voidaan käyttää suihkumoottoreissa esimerkiksi dieselöljyä, lentopetrolia tai propaania. Niiden avulla on toteutettu toimiviksi todettuja turboahdinpohjaisia suih-kumoottoreita. Vaikka kevyen polttoöljyn, dieselin ja lentopetrolin teholliset lämpöar-vot poikkeavat toisistaan vain hieman, niillä voi olla vaikutusta työntövoimaan. Alla on erilaisten, mutta soveltuvien polttoaineiden lämpöarvoja.

Polttoaineiden teholliset lämpöarvot (Teknologiateollisuus 2007; Alakangas 2000; Nes-te Oil 2014):

Kevyt polttoöljy	-	11,86 kWh/kg / 42,4 MJ/kg
Dieselöljy	-	11,89 kWh/kg / 41,5 MJ/kg
Lentopetroli	-	12,03 kWh/kg / 43,2 MJ/kg
Propaani	-	12,80 kWh/kg / 46,3 MJ/kg

Vaikka propaani on tehollisilta lämpöarvoiltaan dieseliä sekä lentopetrolia parempi, liittyy sen pitkäaikaiseen käyttöön turvallisuusriski. Virratessaan propaani jäädyttää, ja ennen pitkää jäädyttää sen virtausta säätelevän venttiilin. Tästä aiheutuvia ongelmia ovat:

- \* propaanivirran vaikeutunut hallittu säätäminen
- \* virtauksen katkaisu hätätilanteessa mahdotonta
- \* virtauksen katkaiseminen turvallisesti vaikeaa.

### **2.6.1 Polttoaineen kulutuksen laskeminen**

Dieselpolttoaineen kulutuksen laskemiseksi täytyi tietää polttoaineen stökiometrinen suhde ja turbon läpi kulkevan ilman määrä. Stökiometrinen suhde on suhdeluku, joka kertoo kuinka paljon ilmaa tarvitaan polttoaineen täydelliseen palamiseen. Dieselille stökiometrinen suhde on 14,6:1 (Goel 2013).

Tämä tarkoittaa sitä, että yhden kilon dieselin palamiseen tarvitaan 14,6 kiloa ilmaa. Kuitenkin testien kautta on havaittu, että suurin teho dieselmootoreilla saavutetaan laihalla seoksella, jossa stökiometrinen suhde on yli 25:1 (Khair & Jääskeläinen 2010). Suihkumootorin harrastelijarakentajat käyttävät jopa 60:1 seosta.

Turbon läpi menevän ilman määrää arvioitiin JetSpecs -ohjelmalla, joka arvioi turbon ominaisuuksi. Kun JetSpecs:iin syötettiin turboahtimen oleelliset mitat, imu- ja pakoaukon ja keskiakselin halkaisijan, se antoi vastaukseksi maksimikierrosnopeuden ja ilman massavirtauksen. Tuloksena oli ilmaa 0,642 lb/s (kuva 8), joka on muunnettuna 17,47 kg/min. Turbon maksimikierrosnopeudeksi JetSpecs arvioi 111 000 kierrosta minuutissa.

**JetSpecs - Turbo Analysis**

RESET Converter: 2.54 cm = 1 inches Convert Exit

Max Turbo RPM  
Compressor Outlet Diameter(inches): 3 Calculate  
Max RPM: 110772

Mass Flow Rate  
Inducer Diameter: 2 Calculate  
Hub Diameter: 0.75  
Mass Flow Rate: 0.642517

Full Analysis - Compressor and Turbine  
Mass Flow Rate: 0.642517 Calculate  
P2 (psig): 32  
Comp. Efficiency: 70 %  
Turbine Efficiency: 78 %  
Nozzle Efficiency: 90 %  
Ambient Temp.: 15 deg. C  
Ambient Pressure: 14.7  
Compressor Temperature Rise: 161.191 deg. C  
Compressor Discharge Temperature: 176.191 deg. C  
Turbine Temp. Drop: 141.582  
Turbine Outlet Temp.: 646.418 deg. C  
Turbine PR Required: 2.13097

Full Analysis - Nozzle  
Nozzle PR: 1.44388  
Nozzle Exit Temp: 574.367 deg. C  
Nozzle Velocity: 1339 ft./sec.  
Jet Nozzle Outlet Density: 38.4294 cu ft/lb.  
Jet Nozzle Area: 2.6554 sq. in.  
Jet Nozzle Diameter: 1.83874 in.  
Thrust: 26.7183 lbs.

Inducer Hub Outlet Diameter

PR = Pressure Ratio P2 = Compressor Discharge Pressure (Boost)

The above figures relate to a possible outcome at max rpm and at max TIT during steady state running. There may be major deviations in the program's theoretically reduced thrust levels at lower to intermediate P2 settings.

Kuva 8. JetSpecs:in turboanalyysi.

Seuraavaksi laskettiin polttoaineenkulutus 60:1 suhteella. Polttoaineen kulutus minuutissa saatiin jakamalla ilmankulutus 60:llä.

$$\frac{17,47 \frac{kg}{min}}{60} = 0,29 \frac{kg}{min}$$

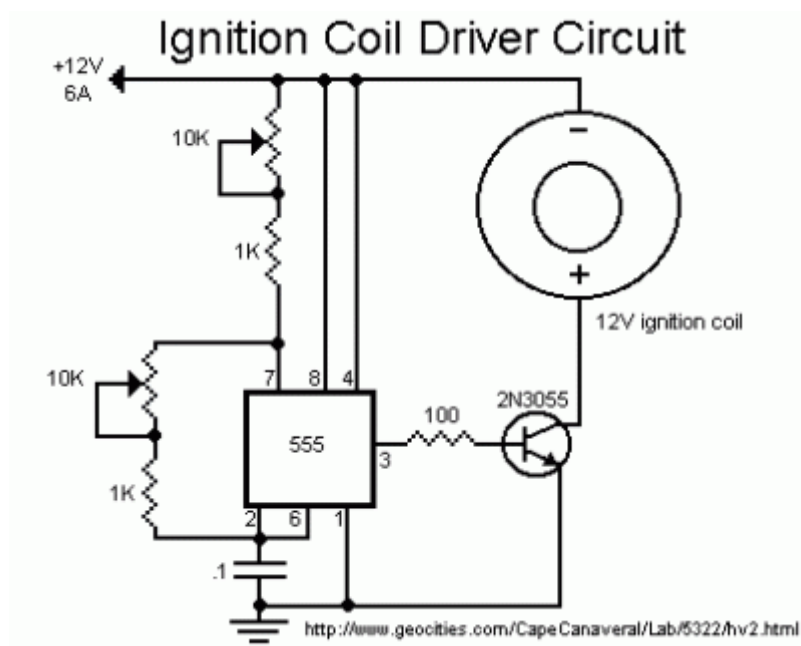
Jotta polttoaineenkulutusta olisi helpompi seurata testeissä virtausmittarilla, täytyi polttoaineen kulutus muuttaa litroiksi minuuttia kohti. Kulutus saatiin litroiksi minuutissa jakamalla se dieselpolttoaineen tiheydellä  $0,845 \text{ t/m}^3 = 0,845 \text{ kg/dm}^3$  (Alakangas 2000, 9).

$$\frac{0,29 \frac{kg}{min}}{0,845 \frac{kg}{dm^3}} = 0,34 \frac{dm^3}{min}$$

Polttoaineen kulutukseksi saatiin 0,34 litraa minuutissa, joka on 60:llä kerrottuna 20,4 litraa tunnissa.

## 2.7 Sytytyspiiri

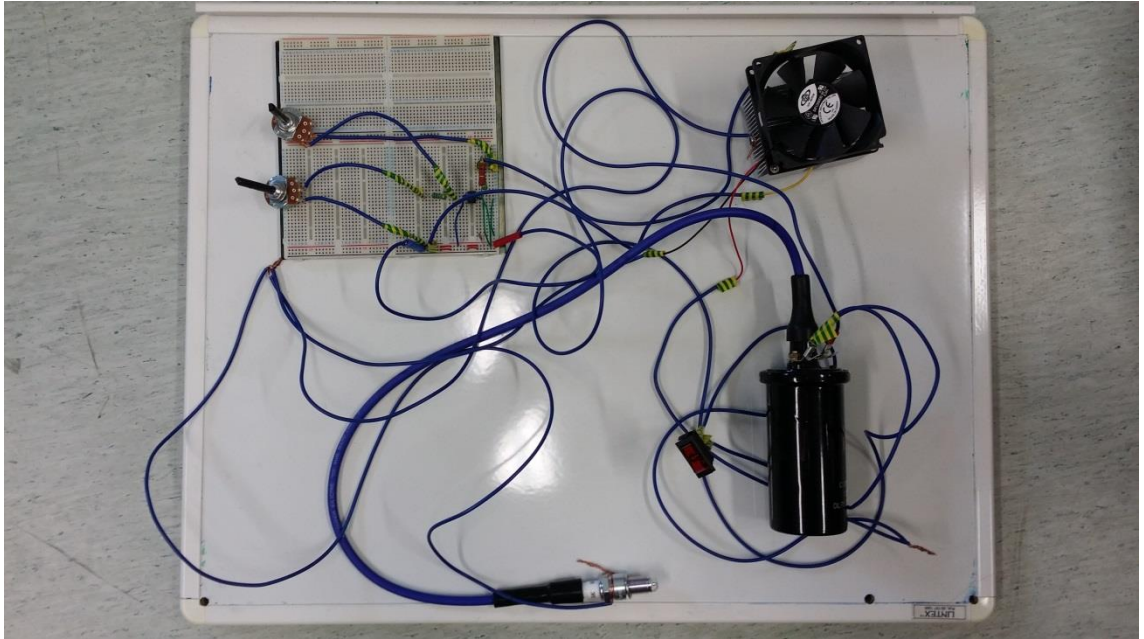
Sytytykseen löydettiin harrastelijoiden suihkumootoreissa hyvin yleisesti käytetyn piirikaavion (kuva 9). Piirikaavion rakentamalla saatiin tuotettua suurjännitettä sytytystulpalle. Kyseinen piirin tärkeimmät komponentit ovat NE555 ajastinpiiri, 2N3055 transistori ja auton sytytyspuola. Muita tarvittavia osia olivat vastukset, kondensaattorit ja potentiometrit eli säätövastukset (Hölttä 2006.)



Kuva 9. Piirikaavio sytytysjärjestelmästä (Datasheet Reference 2014).

Ajastinpiiri NE555 lähettää kanttiaaltoa, toisin sanoen kytkee virran päälle ja pois nopeasti. Ajastinpiirin taajuutta säädetään potentiometreillä. Kun virta katkaistaan äkkinäisesti, se indusoi sytytyspuolaan suurjännitteen, joka näkyy kipinästä sytytystulpan kärjissä. Ajastinpiirin taajuuden säätäminen vaikuttaa samalla myös kipinän syttymistajuuteen ja sen voimakkuuteen.

Piiriin tarvittavat komponentit tilattiin SP-Elektroniikka Oy:ltä ja sytytyspuola ostettiin Motonetistä. Piiri rakennettiin koekytentälevylle, mutta pidempiaikaista käyttöä varten kannattaisi valmistaa piirilevy. Sytytyspiiri voidaan sijoittaa sopivan kokoiseen suoja-laatikkoon niin, että ulkopuolelle jäävät säätöä varten vain potentiometrit ja sytytyspuola ja virtakaapelit.



Kuva 10. Valmiiksi rakennettu sytytyspiiri. Oikeassa yläkulmassa transistorin tuuletin ja sen alapuolella sytytyspuola (Kuva: Jani Karhula 2014).

Sytytyspiiriä ohjataan 12 voltin jännitteellä ja virtalähteenä toimii auton akku. Piirissä oleva tehotransistori kuumenee käytössä ja sille täytyi asentaa jäähdytin (kuva 10). Jäähdytin toteutettiin tietokoneen jäähdytyssiilillä ja tuulettimella, johon transistori ruuvattiin kiinni. Transistorin ja jäähdytyssiilin väliin laitettiin tietokoneissakin käytettyä piitahnaa, jotta lämpö johtuisi tehokkaammin.

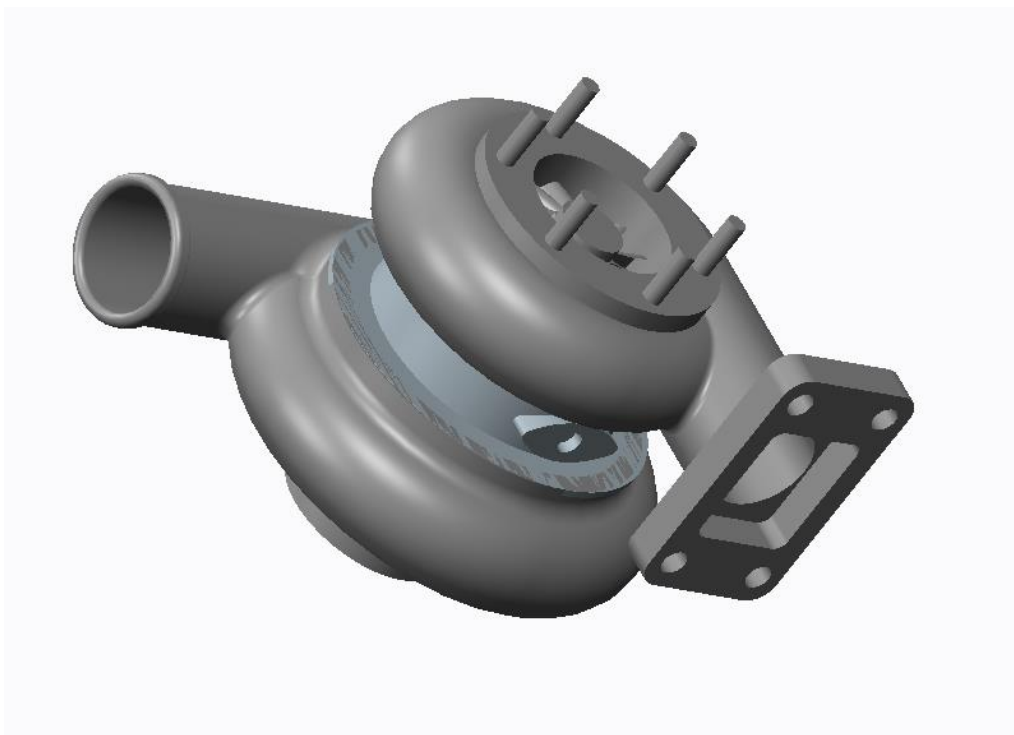


### 3 Suihkumoottorin suunnittelu

Suihkumoottorin suunnittelu -kappaleessa mitoitettiin kaikki suihkumoottorin osat. Kun osien mitat olivat selvillä, ne mallinnettiin Creo Parametrics 2.0 3D-ohjelmalla. Itsevalmistettavista osista tehtiin myös mittapiirustukset laserleikkaukseen.

#### 3.1 Turboahdin

Turboahdinta ei mallinnettu kokonaan itse ajan säästämiseksi. Apuna käytettiin GrabCAD-sivustoa johon ihmiset voivat ladata mallintamiaan kappaleita. GrabCAD:istä etsittiin sopivan mallinen turboahdin ja ladattiin pohjaksi suihkumoottorille (kuva 11).

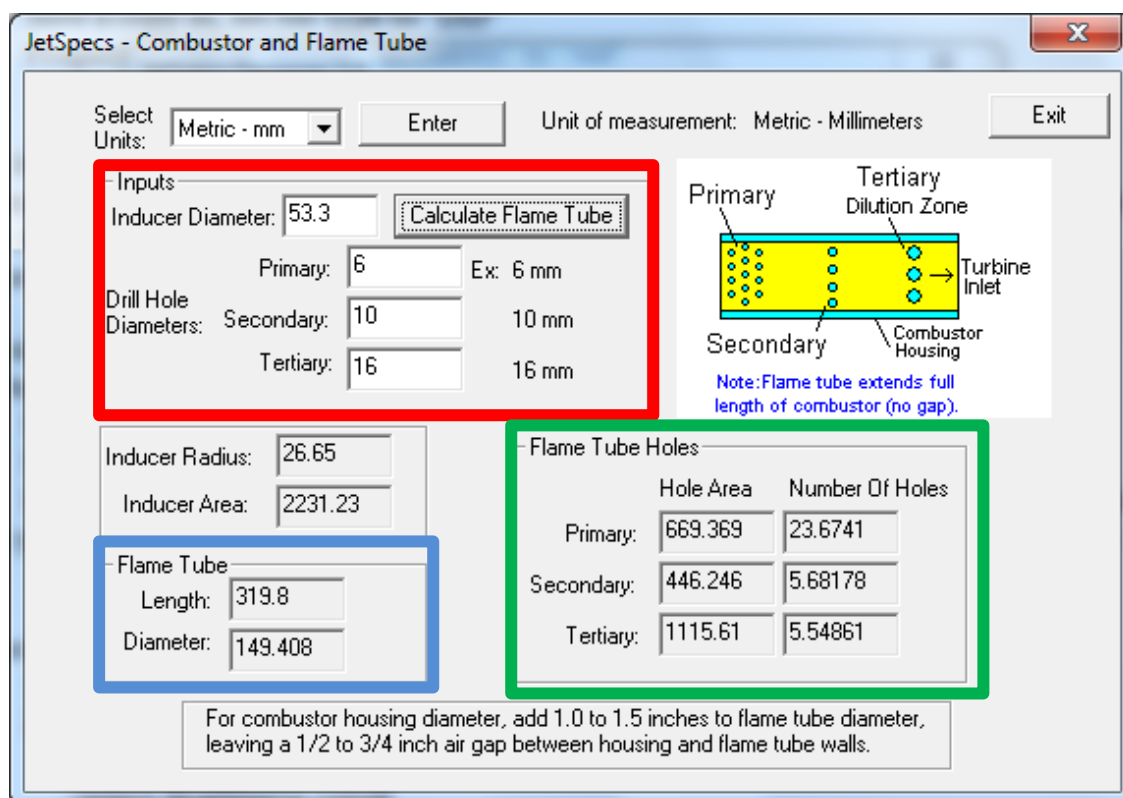


Kuva 11. GrabCAD:istä ladatun turboahtimen kokoonpanokuva.

Turboahtimen osat skaalattiin samankokoiseksi kuin tässä suihkumoottorissa käytetyn turbon osat. Turbon aukkojen halkaisijat ja laipat muutettiin oikean kokoisiksi. Lisäksi tehtiin turbiiniin 6 kierretappia, jotka olivat työssä käytetyssä turbossa.

### 3.2 Liekkiputki

Suihkumootorin suunnittelussa täytyi aloittaa liekkiputken suunnittelemisesta. Liekkiputken mitoittamiseen liittyy hyvin vahvasti turboahtimen imuaukon halkaisija. Liekkiputken mitoituksessa käytettiin netistä saatua JetSpecs Designer 2.0 -ohjelmaa (kuva 12). Se laskee kaikki liekkiputken suunnitteluun tarvittavat parametrit. Ohjelmaan syötetään turbon imuaukon halkaisija sekä haluttujen reikien koko.



JetSpecs - Combustor and Flame Tube

Select Units: Metric - mm Enter Unit of measurement: Metric - Millimeters Exit

**Inputs**

Inducer Diameter: 53.3 Calculate Flame Tube

Primary: 6 Ex: 6 mm

Drill Hole Diameters: Secondary: 10 10 mm

Tertiary: 16 16 mm

Inducer Radius: 26.65

Inducer Area: 2231.23

**Flame Tube**

Length: 319.8

Diameter: 149.408

**Flame Tube Holes**

	Hole Area	Number Of Holes
Primary:	669.369	23.6741
Secondary:	446.246	5.68178
Tertiary:	1115.61	5.54861

Note: Flame tube extends full length of combustor (no gap).

For combustor housing diameter, add 1.0 to 1.5 inches to flame tube diameter, leaving a 1/2 to 3/4 inch air gap between housing and flame tube walls.

Kuva 12. JetSpecs -ohjelmiston laskemat liekkiputken parametrit. Punaisessa laatikossa ovat syötettävät mitat, sinisessä liekkiputken pituus ja halkaisija ja vihreässä reikien lukumäärät.

Ohjelmaan syötettiin punaisen laatikon osoittamalle alueelle (kuva 8) inducer diameter-kohtaan turbon imuaukon halkaisija millimetreinä. Kolmeen seuraavaan tekstikenttään syötettiin haluttujen reikien halkaisijat. Ohjelmassa oli valmiina 6 mm, 10 mm ja 16 mm, joten niitä ei muutettu.

JetSpecs:in avulla saatiin liekkiputkeen tarvittavat suunnittelumitat sekä pinta-ala, mihin tuli pyrkiä porattujen reikien yhteispinta-alassa. Sinisen laatikon alueelle JetSpecs antoi

liekkiputken pituudeksi (Length) 319,8 mm ja halkaisijaksi (Diameter) 149,4 mm. Vihreän laatikon osoittamalle alueelle ohjelma laski tarvittavien reikien lukumäärän (Number of holes) annettujen halkaisijoiden perusteella ja niiden yhteispinta-alan (Hole area).

Ohjelmasta huomattiin, että kaikkien reikien yhteispinta-alat laskettuna yhteen on yhtä suuri kuin imuaukon pinta-ala (Inducer area). Tämän lisäksi huomattiin, että ohjelma määrittelee liekkiputken pituudeksi 6 kertaa imuaukon halkaisija. JetSpecs käyttää reikien pinta-aloissa suhdetta 30 % - 20 % - 50 %, mutta tässä tapauksessa haluttiin käyttää aiemmin luvussa 2.3 mainittua 25 % - 25 % - 50 %. Alla on laskettu reikien lukumäärät eri suhteella.

Kokonaispinta-alasta  $A_{\text{kok}} = 2231,23 \text{ mm}^2$  on 25 %

$$2231,23 \text{ mm}^2 * 0,25 = 557,81 \text{ mm}^2$$

ja 50 % on

$$2231,23 \text{ mm}^2 * 0,5 = 1115,62 \text{ mm}^2.$$

Kuuden ja kymmenen millimetrin reikiä tulee yhteispinta-alaltaan 25 % kumpiakin. 16 mm reikiä tulee 50 % kokonaispinta-alasta. Tästä saatiin seuraava taulukko jossa on laskettu reikien määrä näillä suhteilla:

Taulukko 4. Reikien koot, pinta-alat ja kappalemäärät.

Reiän koko	Reiän pinta-ala $A_{\text{ruuvi}}$	$A_{\text{kok}}/A_{\text{ruuvi}}$	Reikien määrä	Todellinen pinta-ala
6 mm	$28,27 \text{ mm}^2$	19,8	20 kpl	$565,4 \text{ mm}^2$
10 mm	$78,5 \text{ mm}^2$	7,1	7 kpl	$549,7 \text{ mm}^2$
16 mm	$201,1 \text{ mm}^2$	5,6	6 kpl	$1206,4 \text{ mm}^2$
				Yhteensä: $2321,54 \text{ mm}^2$

Todellisilla pinta-aloilla laskettuna suhteiksi saatiin seuraavat arvot:

$$6 \text{ mm: } 565,4 \text{ mm}^2 / 2321,5 \text{ mm}^2 * 100 \% = 24,4 \%$$

$$10 \text{ mm: } 549,7 \text{ mm}^2 / 2321,5 \text{ mm}^2 * 100 \% = 23,7 \%$$

$$16 \text{ mm: } 1206,4 \text{ mm}^2 / 2321,5 \text{ mm}^2 * 100 \% = 52 \%$$

Näillä mitoilla suhteet olivat lähellä oikeaa, mutta reikien kokonaispinta-ala oli liian suuri verrattuna turbon imuaukon pinta-alaan  $2231,2 \text{ mm}^2$ . Tämän vuoksi päätettiin muuttaa reikien määrää, ettei tarvinnut muokata reikien halkaisijoita. Siitä saatiin seuraava taulukko:

Taulukko 5. Reikien koot ja uudet pinta-alat ja kappalemäärät.

Reiän koko	Reiän pinta-ala $A_{\text{ruuvi}}$	$A_{\text{kok}}/A_{\text{ruuvi}}$	Reikien määrä	Todellinen pinta-ala
6 mm	$28,27 \text{ mm}^2$	19,8	22 kpl	$622,6 \text{ mm}^2$
10 mm	$78,5 \text{ mm}^2$	7,1	8 kpl	$628,0 \text{ mm}^2$
16 mm	$201,1 \text{ mm}^2$	5,6	5 kpl	$1005,5 \text{ mm}^2$
				Yhteensä: $2256,1 \text{ mm}^2$

Todellisilla pinta-aloilla laskettuna suhteiksi saatiin uudet arvot:

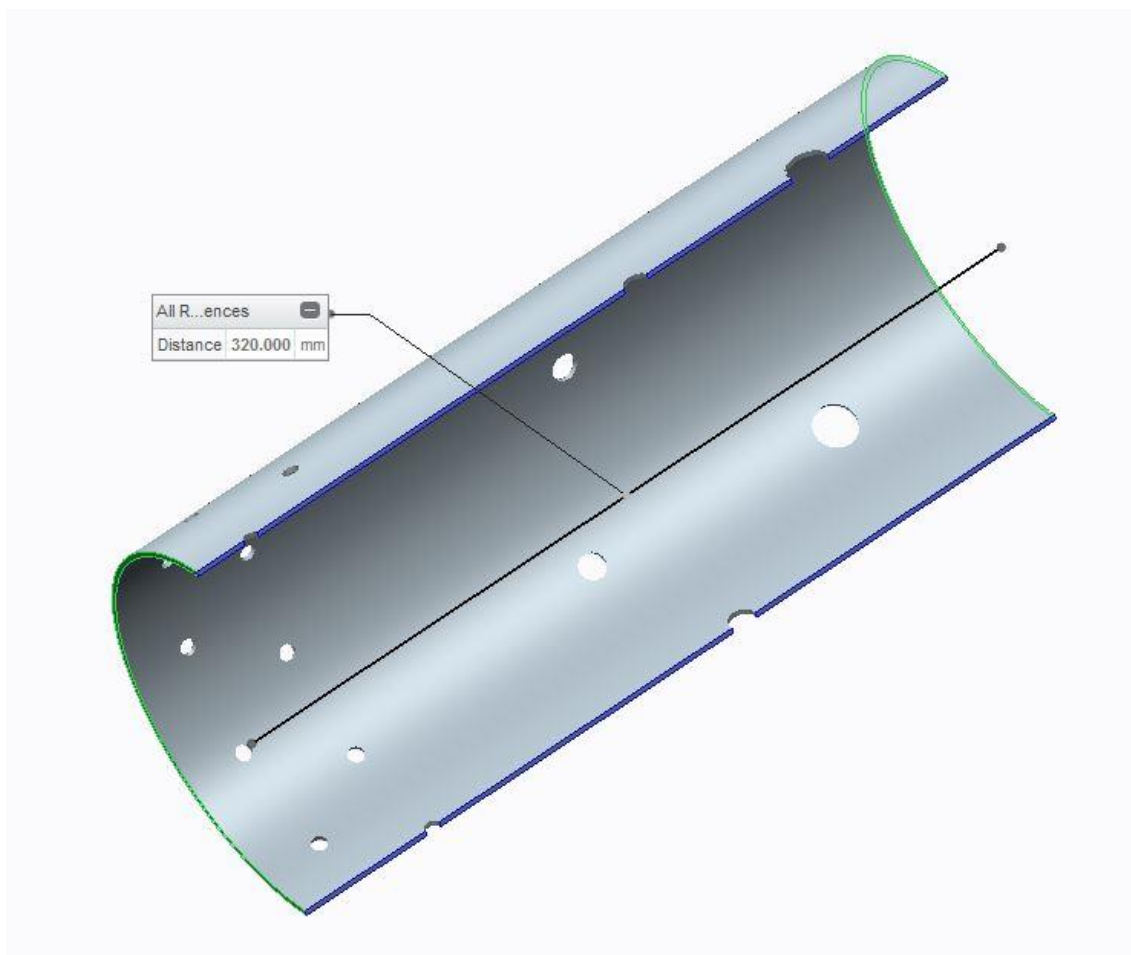
$$6 \text{ mm: } 622,6 \text{ mm}^2 / 2256,1 \text{ mm}^2 * 100 \% = 26,7 \%$$

$$10 \text{ mm: } 628,0 \text{ mm}^2 / 2256,1 \text{ mm}^2 * 100 \% = 28,1 \%$$

$$16 \text{ mm: } 1005,5 \text{ mm}^2 / 2256,1 \text{ mm}^2 * 100 \% = 45,2 \%$$

Reikien yhteispinta-ala  $2256,1 \text{ mm}^2$ . Tämä on lähempänä turbon imuaukon pinta-alaa ja reikien pinta-alojen suhde on siedettävissä rajoissa.

Seuraavaksi kun tiedettiin liekkiputken mitat, voitiin tehdä siitä 3D-malli Creo Parametrics -ohjelmalla. Malli tehtiin 3 mm paksuksi ja siihen tehtiin reiät mittojen mukaisesti (kuva 13). Erikokoisten reikien etäisyyksistä ei ollut JetSpecs:issä mainintaa, joten ne sijoitettiin tasaisin välimatkoin. Mittojen yksinkertaistamiseksi pituudeksi pyöristettiin 320 mm ja sisähalkaisijaksi 150 mm.

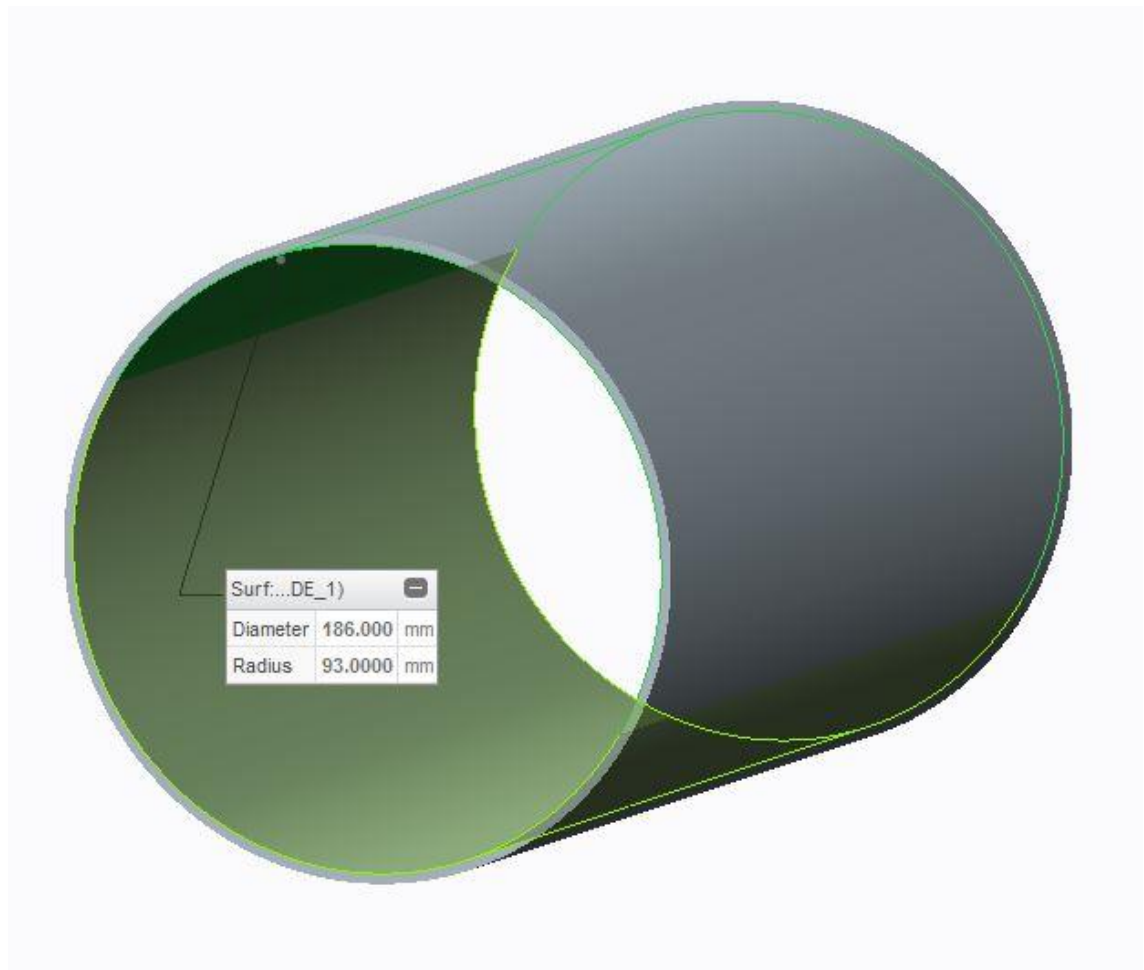


Kuva 13. Poikkileikkauskuva 320 mm pitkstä liekkiputkesta.

### 3.3 Palokammio

Kuten liekkiputken suunnitteluun, myös palokammion suunnitteluun liittyy vahvasti turbon ilmanottoaukon koko, sillä sen tilavuuden on oltava suhteessa sinne toimitettavaan ilmaan. Palokammio oli suunniteltava huolellisesti, koska se on essentiaalinen suihkumoottorin toiminnalle. Siihen liitettiin monia eri komponentteja; erilaisia antureita, sytytystulppa ja polttoainesuutin ja sen piti kaikista lisälaitteistaan huolimatta toimia paikkana, jossa mahdollisimman optimaalinen palotapahtuma pystyisi jatkumaan.

Palokammio (kuva 14) mitoitettiin ensisijaisesti liekki-putken koon mukaan. Hyvä ohjearvo liekki-putken ulkoseinämän välimatkaksi palokammion sisäseinämään oli JetSpecs -ohjelmassa 0,5–0,75 tuumaa, joka on millimetreiksi muutettuna 12,7–19,1 mm. Tässä suunnitelmassa käytettiin 15 mm etäisyyttä palokammion sisäseinämän ja liekki-putken ulkoseinämän välillä.



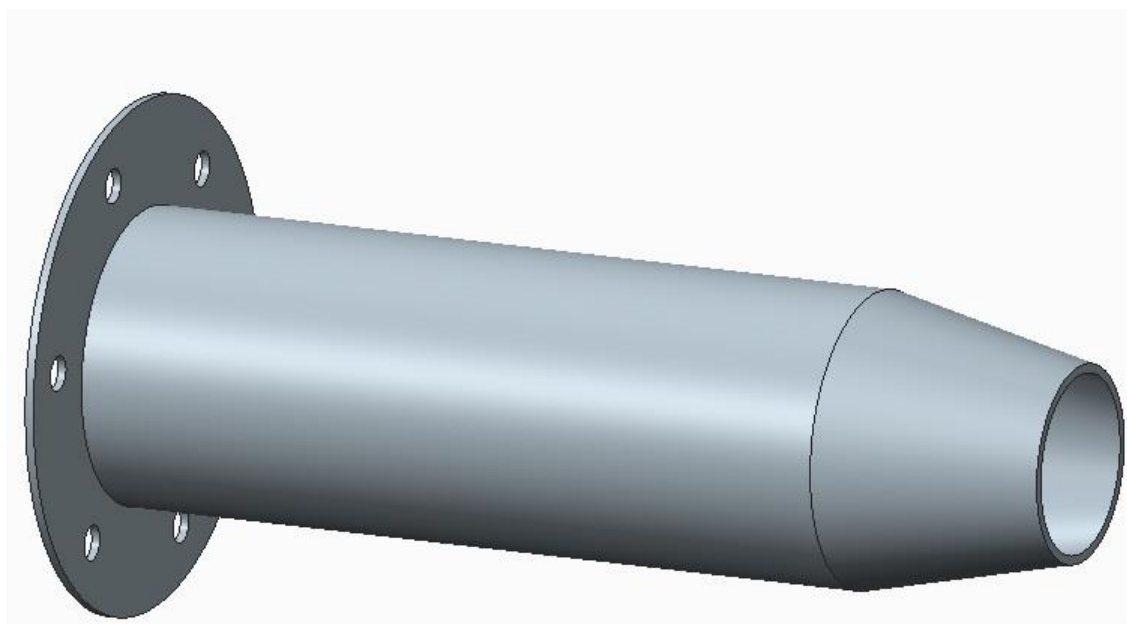
Kuva 14. Valmistuskuva palokammioista.

Kun liekki-putken ulkohalkaisijaan (156 mm) lisättiin 30 mm:n tyhjä tila, palokammion sisähalkaisijaksi tuli 186 mm. Palokammion pituus on 317 mm, koska ilma ei saa karata liekki-putken päädyistä. 3 mm:n erotus johtuu saman paksuisesta laipasta, jonka päälle palokammio tulee.

### 3.4 Suihkuputki- ja suutin

Suihkuputki on turbiinin pakoaukolta lähtevä suora putki, jonka päässä on kapeneva kartio. Suihkuputken tarkoituksena on suunnata turbiinilta tuleva kaasuseos työntövoimaksi. Suihkuputken pituudeksi suositellaan noin 8–9 tuumaa (203,2–228,6 mm). (Shelly 2014.)

Suihkuputken kokonaispituudeksi päätettiin 228 mm, mukaan lukien kartio. Suihkuputken sisähalkaisijaksi määräytyi 63 mm turbiinin pakoaukon mukaisesti. Päätykartion sisähalkaisijaksi suositellaan samankokoista aukkoa kuin turbon imuaukon halkaisija on. Päätykartion kuristaminen vaikuttaa siihen, kuinka paljon lämpötila nousee turbiinilla. Kartiosta päätettiin kuitenkin tehdä pienempi, koska aukkoa on helpompi suurentaa jälkikäteen kuin pienentää sitä. Tässä mallissa kartion sisähalkaisija pienenee 50 mm:n matkalla 39 millimetriin. Tämä on noin 60 % suoran putken halkaisijasta. Suihkuputken päähän mallinnettiin laippa, jolla se kiinnitetään kuudella pultilla turboon (kuva 15).



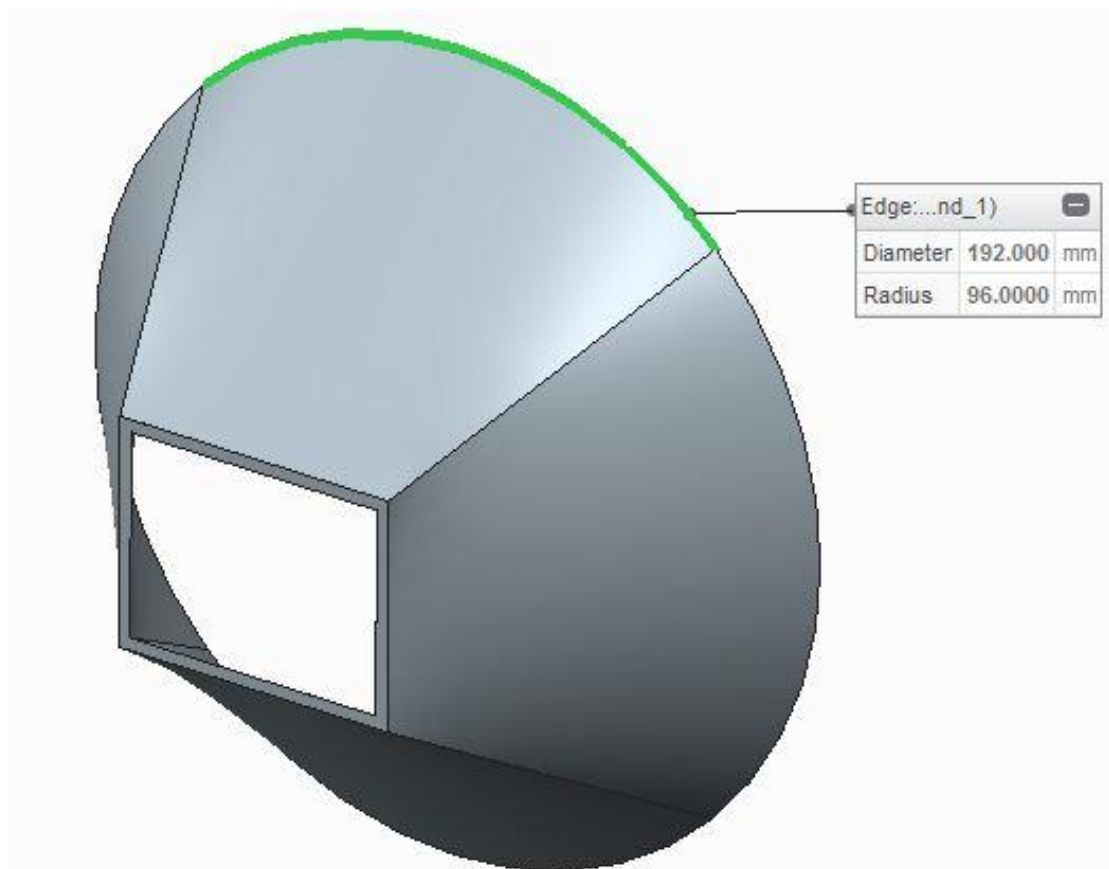
Kuva 15. Kokoonpanokuva suihkuputkesta.

### 3.5 Palokartio

Palokartio (kuva 16) on palokammion päädyssä turboahtimen turbiinille johtava kapea putki. Palokartio on yksi suihkumoottorin kriittisimmistä osista siihen kohdistuvan

kuumuuden vuoksi. Palokammionista tuleva kaasuseos on kuumimmillaan palokartion kohdalla, kunnes kaasuseos jäähtyy turbiinin läpi mentäessä.

Palokartion vaihtuva muoto tekee siitä hankalan valmistettavan mutta mallinnus oli kohtuullisen yksinkertaista kun liekki-putken ja turbiinin aukkoa käytettiin referenssinä. Palokammion päähän voi asentaa suoran laipan ilman kartiota jos turbossa on tarpeeksi pitkä turbiinin kanava. Tässä työssä käytettyä turboa ei kuitenkaan mahduttu asentamaan ilman kartiota.



Kuva 16. Palokartion 3D-kuva.

Palokartion pyöreän osan sisähalkaisija on sama 150 mm kuin liekki-putken sisähalkaisija. Kartio kapenee 55 mm:n matkalla 65 mm \* 49 mm kokoiseksi suorakulmioksi.



### 3.6 Kiinnityslaipat

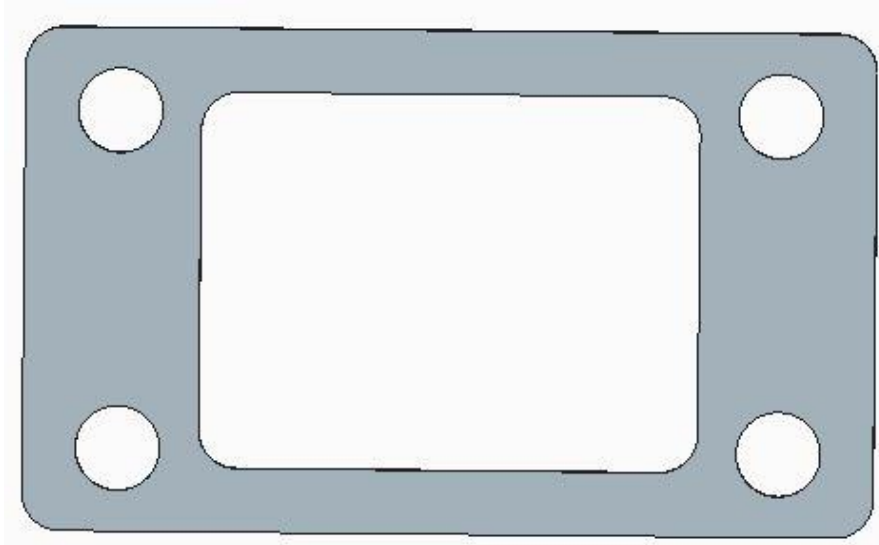
Suihkumoottoriin mallinnettiin tarvittavat kiinnityslaipat. Laipoilla pystytään osat kiinnittämään toisiinsa nopeasti ja irrottamaan ne tarpeen vaatiessa. Suunnittelussa osat mitoitettiin palokammion ja liekkiputken mukaan. Turboon kiinnitettävät laipat ovat standardiosia, mutta ne mitattiin silti käsin turbon mukaan ja mallinnettiin uudestaan.

Liekiputken päähän suunniteltiin laippa (kuva 17), joka hitsataan kiinni ilmatiiviisti. Laipan halkaisija suunniteltiin sen mukaan, että palokammion ja laipan reunan väliin mahtui reiät pulttiliitoksille. Laipan halkaisijaksi tuli 276 mm ja siihen tehtiin 24 kappaletta 10,5 mm:n reikiä tasaisin välein.



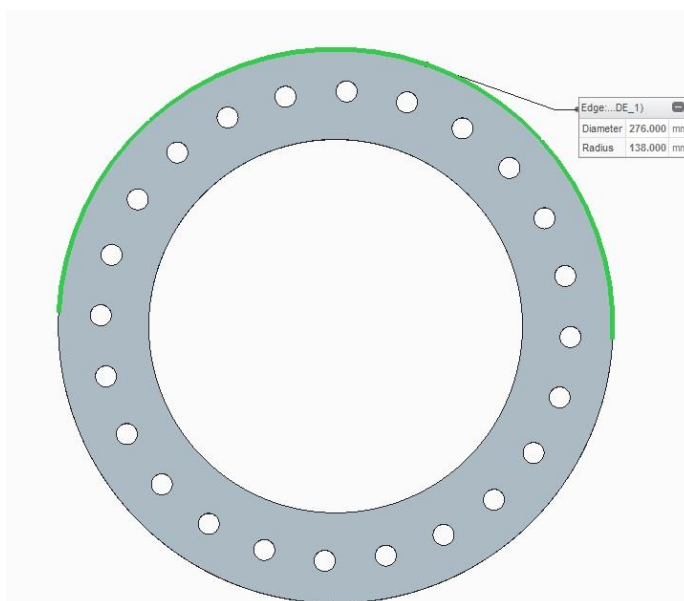
Kuva 17. Liekiputken päätylaippa johon myöhemmin lisättiin reiät polttoainesuuttimelle ja sytytystulpalle.

Turbon ja palokartion väliin mallinnettiin 3 mm paksu laippa (kuva 18), joka kiinnitetään turbiiniin pulttiliitoksella. Laippa on standardi turbon T3-laippa. Reikien väli on 85,7 mm ja 44,5 mm.



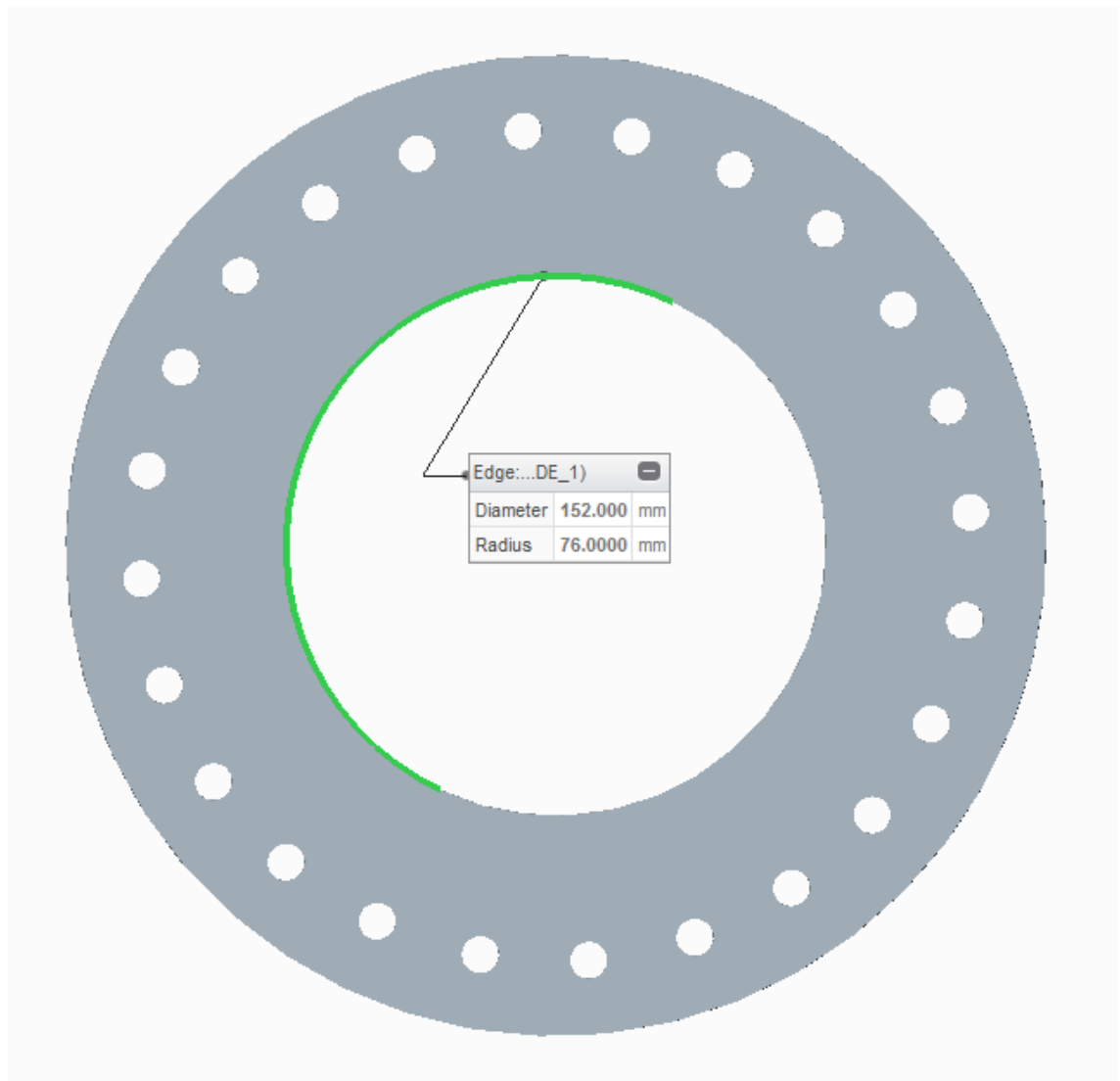
Kuva 18. Turbiinin laippa johon palokartion toinen pää hitsataan.

Palokammion päähän suunniteltiin kiinnihitsattava laippa (kuva 19). Laipan sisähalkaisija on sama 186 mm kuin palokammion sisähalkaisija. Ulkohalkaisija on sama kuin liekkiputken halkaisija. Palokammio kiinnitetään laippoineen liekkiputken ympärille pulttiliitoksella jonka reikien jakoväli on sama kuin liekkiputken laipalla.



Kuva 19. Palokammion päädyn kiinnityslaippa.

Palokammion turbiinin puoleiseen päähän tehtiin päätylaippa (kuva 20) johon palokartio hitsattiin kiinni. Laipan reiän halkaisija on 152 mm ja se sulkee palokammion ja liekki-putken välisen ilmatilan päädyssä. Tällöin kompressorilta tulevan ilman on pakko kulkea liekki-putken reikien kautta. Laippa tehtiin samasta mallista kuin muutkin isot laipat. Tämä säästää aikaa suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Pultin reikiä voidaan käyttää testialustan kiinnitykseen.

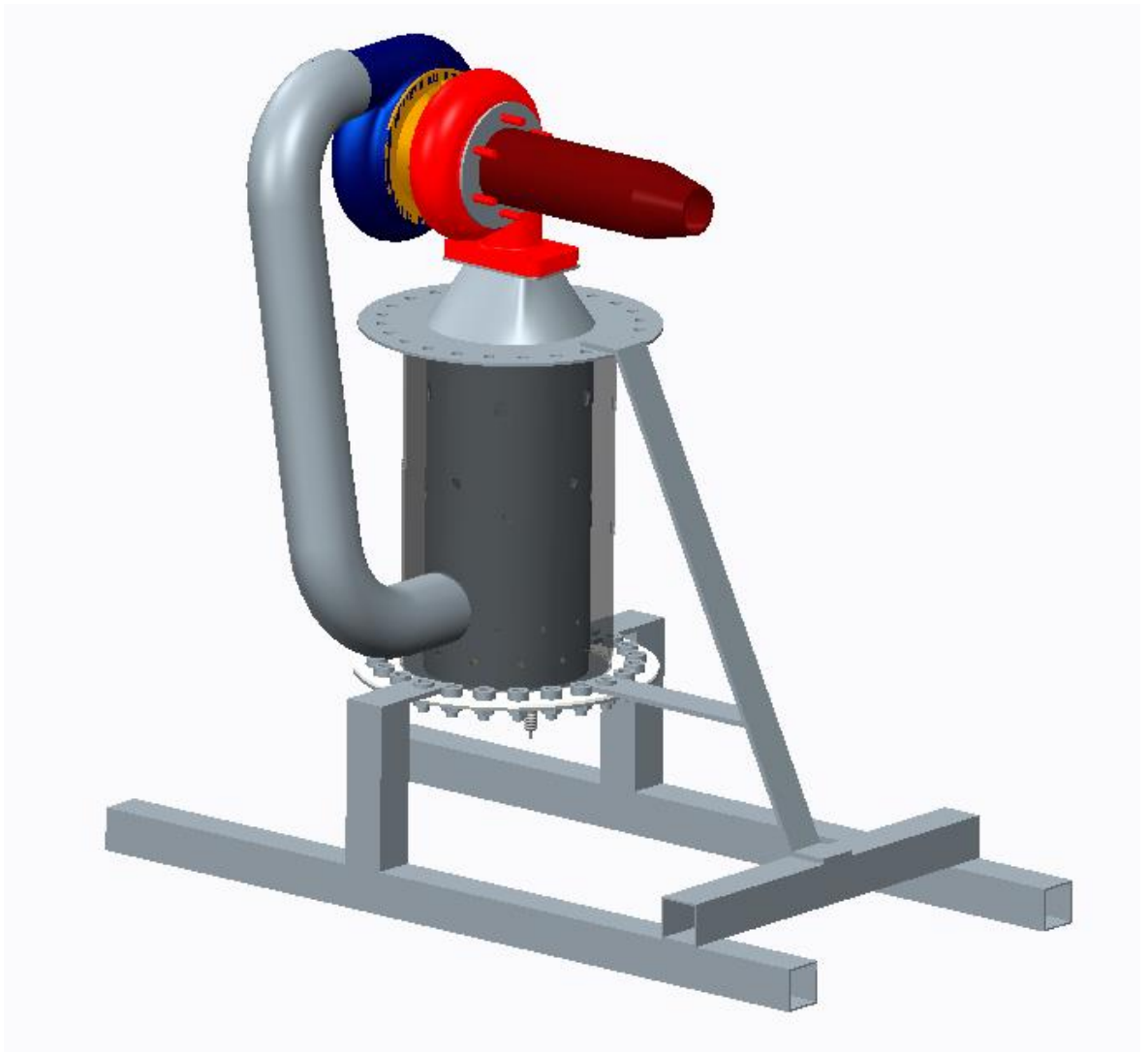


Kuva 20. Palokammion päätylaippa pienemmällä keskireiällä, johon palokartio tulee kiinni.

### 3.7 Suihkumoottorin kokoonpano ja testialusta

Suihkumoottorille tehtiin kokoonpanoa sitä mukaa, kun edellinen osa saatiin valmiiksi. Näin pystyttiin mitoittamaan seuraavat osa käyttäen apuna kokoonpanoa. 3D-mallissa aloitettiin turbosta jonka jälkeen lisättiin palokartio, liekkiputki, palokammio ja laipat. Lopuksi lisättiin suihkuputki sekä kompressorilta palokammioon johtava putki.

Suihkumoottorin testausta varten sille täytyi suunnitella ja valmistaa tukeva testausalusta. 3D-mallille (kuva 21) suunniteltiin esimerkkinä yksi ratkaisu testausalustasta, mutta lopullinen alusta tehtiin pajasta löytyvistä materiaaleista.

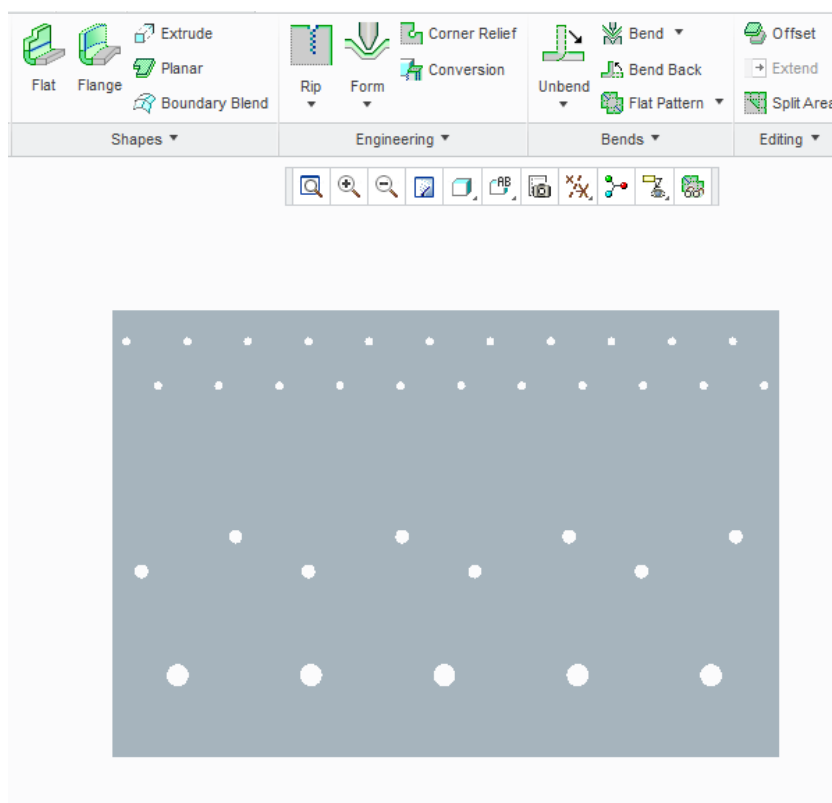


Kuva 21. Kokoonpanokuva suihkumoottorista valmiin testausalustan päällä.

Suihkumoottori voidaan asentaa siten, että palokammio on pysty- tai vaakatasossa. Tässä työssä palokammio täytyi asentaa pystyasentoon voitelujärjestelmän vuoksi. Suihkumoottorissa käytetyn turbon voitelukanaviston paluuputki tulee palokammiota kohti. Voiteluöljyn täytyy päästä virtaamaan vapaasti ulos turbosta ja takaisin öljysäiliöön tai muuten öljy kuumenisi liikaa.

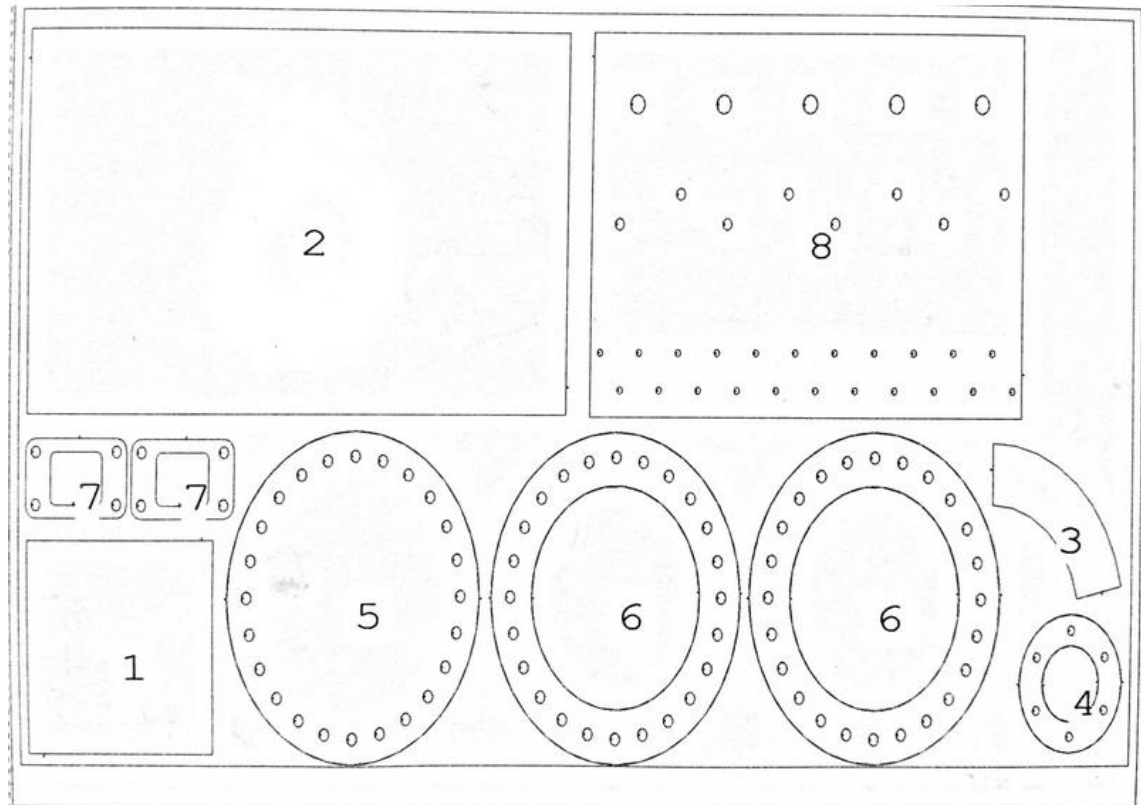
### 3.8 Valmistuskuvat laserleikkurille

Osien valmistamiseksi laserilla, niistä täytyi tehdä 2D-kuvat mittoineen. Laserleikkuri käyttää DXF-formaattia kappaleille. Jotta osista pystyttiin tekemään kuvat, pitivät kappaleet taivuttaa auki levymalliksi. Tämä tapahtui Creossa leikkaamalla kappaleiden seinämään 0,1 mm:n rako. Sen jälkeen Creosta valittiin toiminto ”Convert to Sheetmetal”, joka avaa kappaleen levymetallipuolella. Sieltä löytyy toiminto ”Unbend” (kuva 22) jolla esimerkiksi sylinterimäinen kappale taivutetaan auki levyksi.

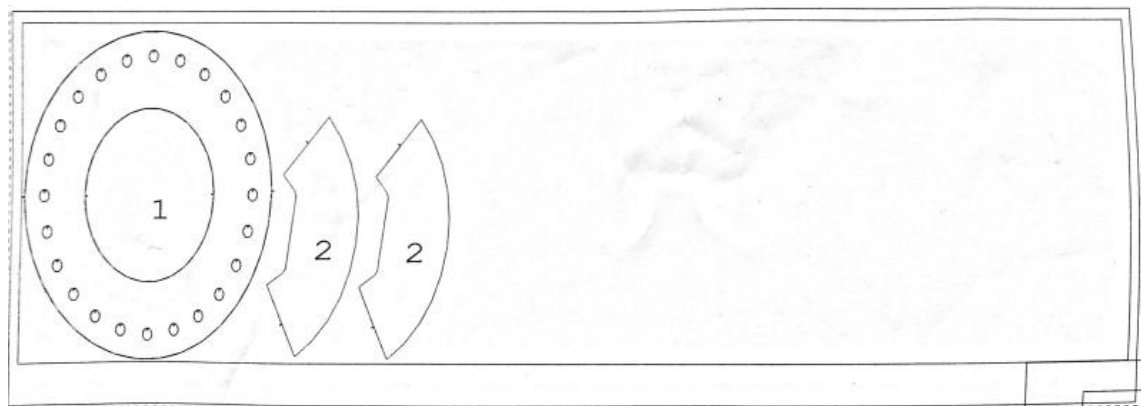


Kuva 22. Sheetmetal-ominaisuus Creossa. Esimerkkinä liekkiputki taivutettuna levyksi.

Levymallista tehtiin Creo Parametrics -ohjelmalla ensin tavallinen valmistuskuva DRW-formaattiin. Tämän jälkeen piirustus tallennettiin kopiona DXF-formaattiin ja asetuksista määrättiin geometrian väriksi punainen. Kaikista piirustuksista tehtiin Finel-comp Oy:llä ohjelma laserleikkurille kahteen eri DXF-tiedostoon.



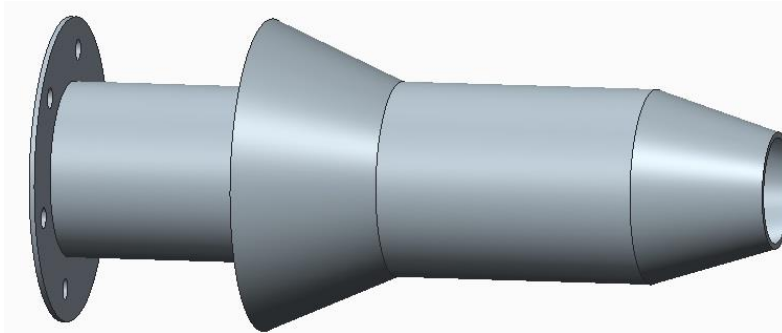
Kuva 23. Suihkumoottorin osia. 1: suihkuputki, 2: palokammio, 3: suihkuputken kartio, 4: suihkuputken laippa, 5: liekkiputken pääty, 6: palokammion laippoja kaksi kappaletta, 7: turbiinin laippoja kaksi kappaletta ja 8: liekkiputki.



Kuva 24. Turbiinin puoleinen palokammion laippa sekä palokartion puolikkaat.

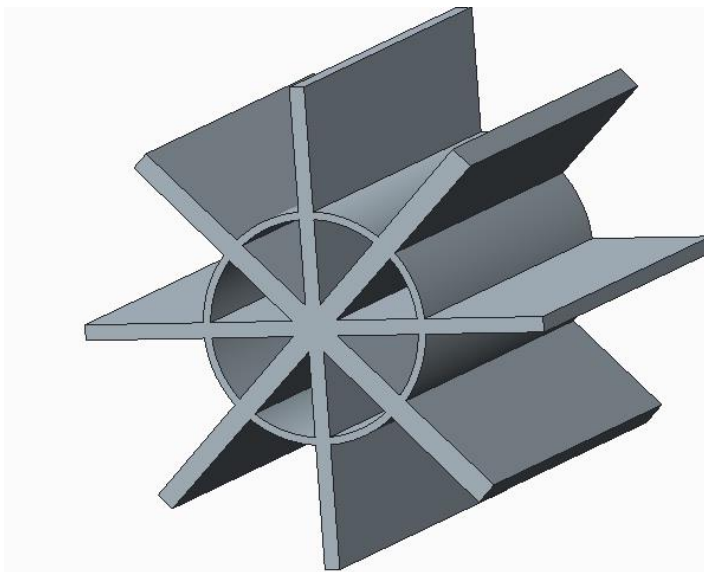
### 3.9 Vaihtoehdot

Vaihtoehtoiseksi ratkaisuksi suunniteltiin tulevaisuutta varten myös toisen mallinen suihkuputki. Tässä mallissa (kuva 25) on pyritty luomaan varsinaisen päävirtauksen ympärille ohivirtausta halkaisemalla perinteinen malli keskeltä ja muotoilemalla muodostuneista osista kartiomallinen augmenttori-ratkaisu.



Kuva 25. Kokeellinen suihkuputki augmenttorilla.

Yhdeksi parannusvaihtoehdoksi päätettiin myös suunnitella ilmanvakaaja (kuva 26). Ilmanvakaaja on eräänlainen ilmapirran ohjuri, jonka tarkoituksena on pysäyttää ilman pyörteily. Pyörimiseen sitoutunut liike-energia muuttuu paineeksi ja tämän vuoksi pakokaasun ulospurkausnopeus kasvaa. Tällä kokeilulla pyritään lisäämään suihkumoottorin tuottamaa työntövoimaa. Vakaajan pituuden mitta tulee olla vähintään suihkuputken halkaisijan verran.



Kuva 26. Suihkuputken vakaajarakenne.



### 3.10 Turvallisuussuunnitelma

Kun ollaan tekemisissä suihkumoottorin, nopeasti pyörivien osien ja palavien aineiden kanssa, täytyy olla erityisen varovainen ja huolehtia turvallisuudesta. Suihkumoottorin rakennusta ja testausta varten tehtiin riskien arviointi (liite x) ja sen pohjalta tehtiin turvallisuussuunnitelma. Riskienarviontilomakkeita saa Työturvallisuuskeskuksen kotisivulta (TKK 2014).

Suihkumoottorin ollessa käynnissä, siitä lähtee mahdollisesti yli 140 dB:n äänenpaine. Tämän vuoksi sitä ei voida käyttää asutuksen lähellä. Asutuksen lisäksi pitää ottaa huomioon suihkumoottorin polttoaineiden aiheuttama tulipalovaara. Parhaita vaihtoehtoja testauspaikoiksi ovat erikokoiset hiekka- ja soramontut (kuva 27), tarpeeksi kaukana asutuksesta.



Kuva 27. Esimerkkikuva testipaikaksi soveltuvasta soramontusta (Google Maps 2014).



### 3.11 Öljy- ja polttoainejärjestelmä

Öljysäiliöksi päätettiin ostaa 20 litran Jerry-kanisteri. Voiteluöljyksi ostettiin kaksi viiden litran 5W-40-moottoriöljypurkkia, joka on tarkoitettu erityisesti dieselmootoreille joissa on turboahdin.

Öljyjärjestelmän kokonaisuuteen kuuluu järjestyksessä; öljysäiliö, imuletku säiliöstä pumpulle, paineletku pumpulta turbolle ja paluuletku turbolta öljysäiliöön. Pumpulta turbolle menevään paineletkuun laitetaan öljynpainemittari.

Öljypumpuksi käyvät hammasrataspumput joissa on 2 - 4 baarin paine ja noin 3 - 5 l/min tuotto. Tähän suihkumoottoriin päätimme kuitenkin kokeilla halvempaa, suuritehoisiin autoihin tarkoitettua polttoainepumppua. Lisäksi ostettiin vielä halvempi moottoriöljyn vaihtoon tarkoitettu pumppu.

Polttoaineena päätettiin käyttää tässä vaiheessa propaania. Dieselille sopivia polttoainepumppuja oli vaikea löytää lyhyellä toimitusajalla ja ne olisivat tulleet maksamaan suuren osan suihkumoottoriin käytetystä budjetista. Propaanille riittää korkeapaineventtiili ja neulaventtiili kaasuvirtauksen hallittuun säätelymiseen.

Koululta löydettiin sopiva korkeapaineventtiili, jolla saavutetaan maksimissaan neljän baarin syöttöpaine. Neulaventtiili löytyi tavaratalosta ostetusta rengaspolttimosta. Venttiili irrotettiin rengaspolttimosta ja se voitiin sen jälkeen kiinnittää polttoaineletkuun. Ensin korkeapaineventtiili kiinnitetään kaasupulloon. Korkeapaineventtiililtä vedetään letku neulaventtiiliin ja siitä edelleen polttoainesuuttimelle.

## 4 Rakentaminen

### 4.1 Osat ja hitsaus

Osat (kuva 28) laserleikattiin, mankeloitiin ja särmättiin Outokumpulaisessa Finelcomp Oy:ssä. Hitsaukseen käytettiin Karelia AMK:n työpajan MIG-hitsauskonetta. Koneella pystyttiin hitsaamaan valittua terästä hyvin, ilman ongelmia. Mutta toteutuneet hitsaumat eivät omaa samankaltaisia korroosion vastaisia ominaisuuksia kuin ruostumaton teräs ja täten ajan kuluessa ne ruostuvat.



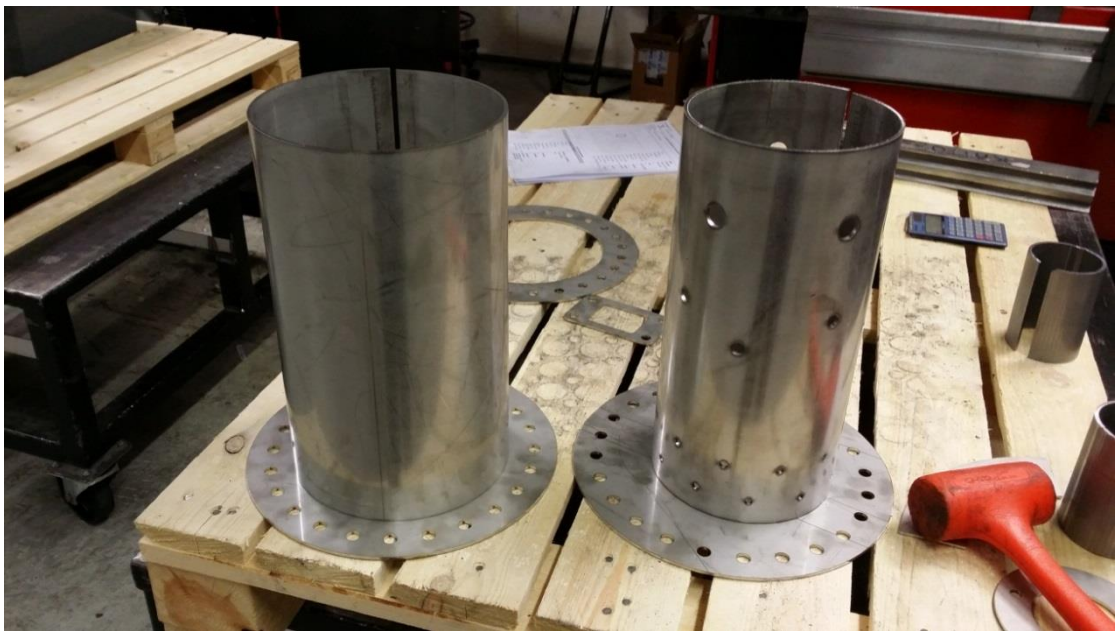
Kuva 28. Osat odottamassa mankelointia ja särmäystä (Kuva: Jani Karhula 2014).

## 4.2 Palokammio ja liekkiputki

Palokammio sekä liekkiputki (kuva 30) toimitettiin valmiiksi laserleikattuna sekä mankeloituna (kuva 29) oikeaan halkaisijaan. Molemmissa oli mankelin jäljiltä avoin sauma, joka hitsattiin kiinni.



Kuva 29. Liekkiputki mankelissa (Kuva: Jani Karhula 2014).



Kuva 30. Palokammio sekä liekkiputki ennen hitsausta (Kuva: Jani Karhula 2014).

Liekkiputki hitsattiin kiinni päätylaippaan siten, että reiät asettuivat pienimmästä suu-  
rimpaan (kuva 31). Palokammioon hitsattiin samankaltainen laippa suuremmalla keski-  
reiällä (kuva 32).



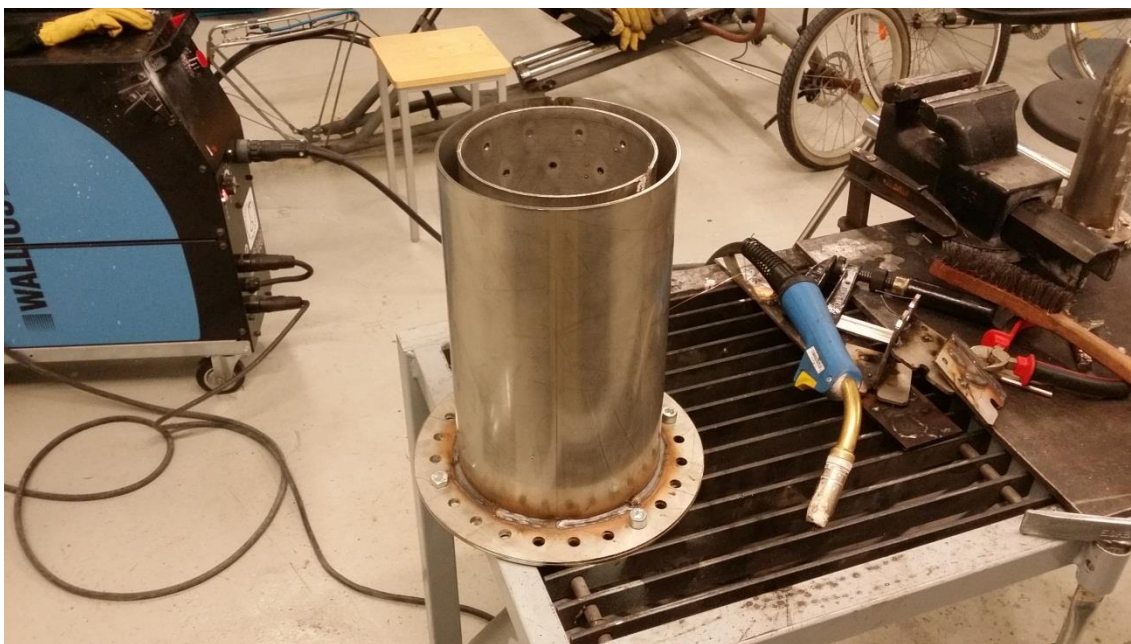
Kuva 31. Liekkiputken hitsaus (Kuva: Jani Karhula 2014).



Kuva 32. Palokammion päätylaippa (Kuva: Jani Karhula 2014).



Liekkiputken päätylaippaan tehtiin 14 mm:n reikä sytytystulpalle ja 8 mm:n reikä kaasusuuttimelle. Sytytystulpasta hiottiin pinnoite pois ja se hitsattiin juurestaan kiinni laippaan. Suihkumootorille valmistettiin kaasusuutin M8x40 pultista. Pulttiin porattiin akselin suuntaisesti melkein läpi asti menevä 4,8 mm:n reikä. Sen jälkeen siihen porattiin säteen suuntaisesti kaksi 3 mm:n reikää. Näin saatiin kaasulle neljä ulostuloreikää. Valmis suutin hitsattiin kannastaan kiinni liekkiputken laippaan.



Kuva 33. Palokammion testikokoonpano (Kuva: Jani Karhula 2014).

Palokammion turbiinin puoleiseen pätyyn hitsattiin palokartio. Valmistussyistä palokartio oli kahdessa osassa. Sovittaessa turbiinin laippaa (kuva 34) huomattiin, että kartion ja laipan reikien väliin ei mahdu standardikokoinen pultti. Korjaukseksi pultit hitsattiin kiinni laippaan sekä niiden kannat hiottiin ja muotoiltiin siten, että laipparakennelma pystytettiin asettelemaan kartion päälle (kuva 35).



Kuva 34. Palokammiossa käytetty turbiinipäädyn laippa (Kuva: Jani Karhula 2014).



Kuva 35. Kokoonpantu palokammio (Kuva: Jani Karhula 2014).

### 4.3 Suihkuputki

Suihkuputki kasattiin kolmesta osasta, itse putkesta (kuva 36), sen päätyyn tulevasta suutin osasta (kuva 37) sekä päätylaipasta jolla suihkuputki liitetään kiinni turboon. Kuten palokammion osat, myös suihkuputki piti hitsata ensin kiinni, jonka jälkeen suutin liitettiin putkeen (kuva 38).



Kuva 36. Suihkuputki mankeloinnin jälkeen (Kuva: Jani Karhula 2014).



Kuva 37. Suihkuputki ja -suutin (Kuva: Jani Karhula 2014).





Kuva 38. Suihkuputki valmiina (Kuva: Jani Karhula 2014).

#### 4.4 Testialusta ja kokoonpano

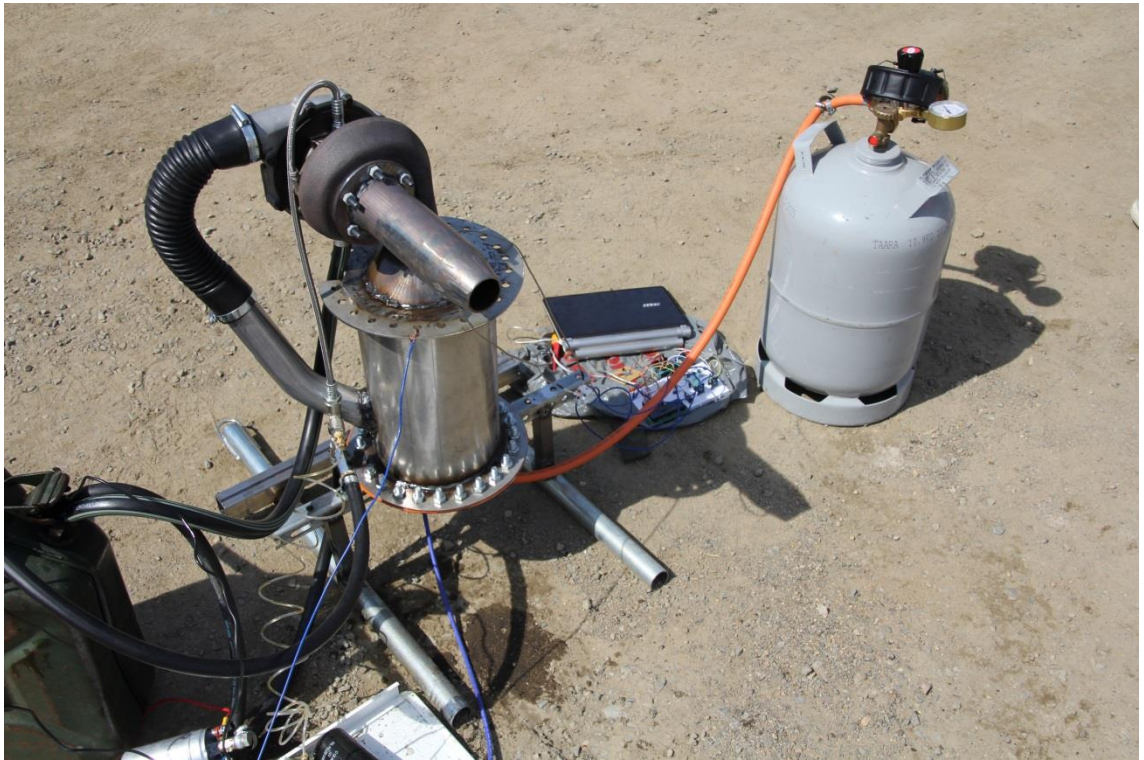
Testialusta rakennettiin osittain alkuperäisen suunnitelman mukaan. Alustan jaloiksi löydettiin kaksi teräsputkea joiden päissä oli kiinnityslenkit. Liekkiputken alle jätettiin 20 - 30 cm:n tila polttoaineputkea ja sytytystä varten. Tämä toteutettiin hitsaamalla korokkeeksi kaksi varastosta löytynyttä neliöputkea

Alustan jalkojen väliin hitsattiin neliöputki pitämään ne erillään. Tähän neliöputkeen hitsattiin taivutettu lattarauta, jonka päähän tehtiin yksi kiinnitysreikä suihkumoottorille. Kahden korokepalkin päälle hitsattiin reiällistä teräsprofiilia. Teräsprofiilissa oli valmiiksi sopivan kokoiset reiät suihkumoottorin kiinnitystä varten.

Testialustan rakentamisen jälkeen voitiin suihkumoottori kasata valmiiksi testausta varten. Palokammio laitettiin liekkiputken päälle ja laippojen väliin laitettiin lämpöä kestävä tiiviste. Kokonaisuus asennettiin kiinni testialustaan 24:llä M10x30 pultilla. Palokammion päälle laitettiin tiiviste ja turbo ja ne kiristettiin tiukasti neljällä mutterilla.



Lopuksi voitiin asentaa suihkuputki turbon pakoaukolle kuudella M8 mutterilla. Öljyputket ja loput komponentit asennettiin testauspaikalla (kuva 39).



Kuva 39. Suihkumoottori valmiina testiin (Kuva: Jani Karhula 2014).

## 5 Mittaukset ja testitulokset

### 5.1 Anturointi

Koska moottori altistuu suurille lämpötiloille ja kierrosnopeuksille, on siinä tapahtuvien prosessien valvominen tapaturmavaaran takia äärimmäisen tärkeää. Anturointi päätettiin toteuttaa Arduino-kehitysalustalla (liite 1), johon voi lisätä tai modifioida erilaisia antureita sekä mittareita. Koska toteuttajilla ei ollut kokemusta Arduinon käytöstä, annettiin tietotekniikan opiskelijan Mauri Mustosen tehtäväksi hoitaa Arduinon koodauksen ja antureiden toiminnan.

Arduinoon liitettiin LCD-näyttö, josta pystyttiin tarkkailemaan kriittisiä mittaussarvoja. Tämän lisäksi mittaussarvot pystytään siirtämään tietokoneelle listamuodossa. Tämän jälkeen arvot on helppo siirtää MS Exceliin ja piirtää lämpötilakuvaajat ajan suhteen. Polttoaineen ja voiteluöljyn painetta tarkkailtiin perinteisistä painemittareista, eikä niitä ryhdytty sähköistämään. Arduinosta voitiin ottaa ulos kierrosnopeuden sekä kahden halutun kohteen lämpötila.

Kaupallisessa sovelluksessa mitatut perussuuret ovat:

$P$ = paine yleensä	$T$ = lämpötila yleensä
$P_t$ = kokonaispaine	$T_t$ = kokonaislämpötila
$P_s$ = staattinen paine	$T_s$ = staattinen lämpötila
$P_{ts}$ = kokonaispaine moottorin alueelta	$T_{ts}$ = kokonaislämpötila moottorin alueelta

”Suihkumoottorin toiminnan aikana moottorilta mitataan useita eri paine- ja lämpötila-arvoja ja niitä käytetään moottorin toiminnan ilmaisuun ja moottorin toimintojen säätöön” (Koivisto & Jokinen 2008, 85)

Mittauksia päätettiin ottaa tässä työssä kolmesta paikasta: lämpötila turbiinin edestä ja pakokaasun lämpötila suihkuputken suuttimelta, sekä kierrosnopeus imuaukolta turbon akselist.

## 5.2 Testaus ja testitulokset

Testipäivän aamuna suihkumoottori, kaasupullo, öljyjärjestelmä, anturit ja työkalut siirrettiin autoon. Mukaan otettiin myös kameroita kuvausta varten ja varapumppu öljylle, joka osoittautui tarpeelliseksi myöhemmin testin aikana. Kaikilla testaajilla oli mukana tarvittavat suojavälineet. Testauspäivänä ulkoilman lämpötila oli yli 29 °C.

Suihkumoottori ja tarvikkeet ajettiin autolla soramontulle, noin 15 kilometrin päähän Joensuusta. Tavarat kannettiin kauemmaksi autosta tasaiselle sora-alueelle. Testipaikalla suihkumoottoriin kiinnitettiin öljy- ja kaasuletkut sekä anturit. Mukana oli myös lainassa oleva polttomoottorikäyttöinen lehtipuhallin, jota käytettiin suihkumoottorin käynnistykseen ja jäähdytykseen.

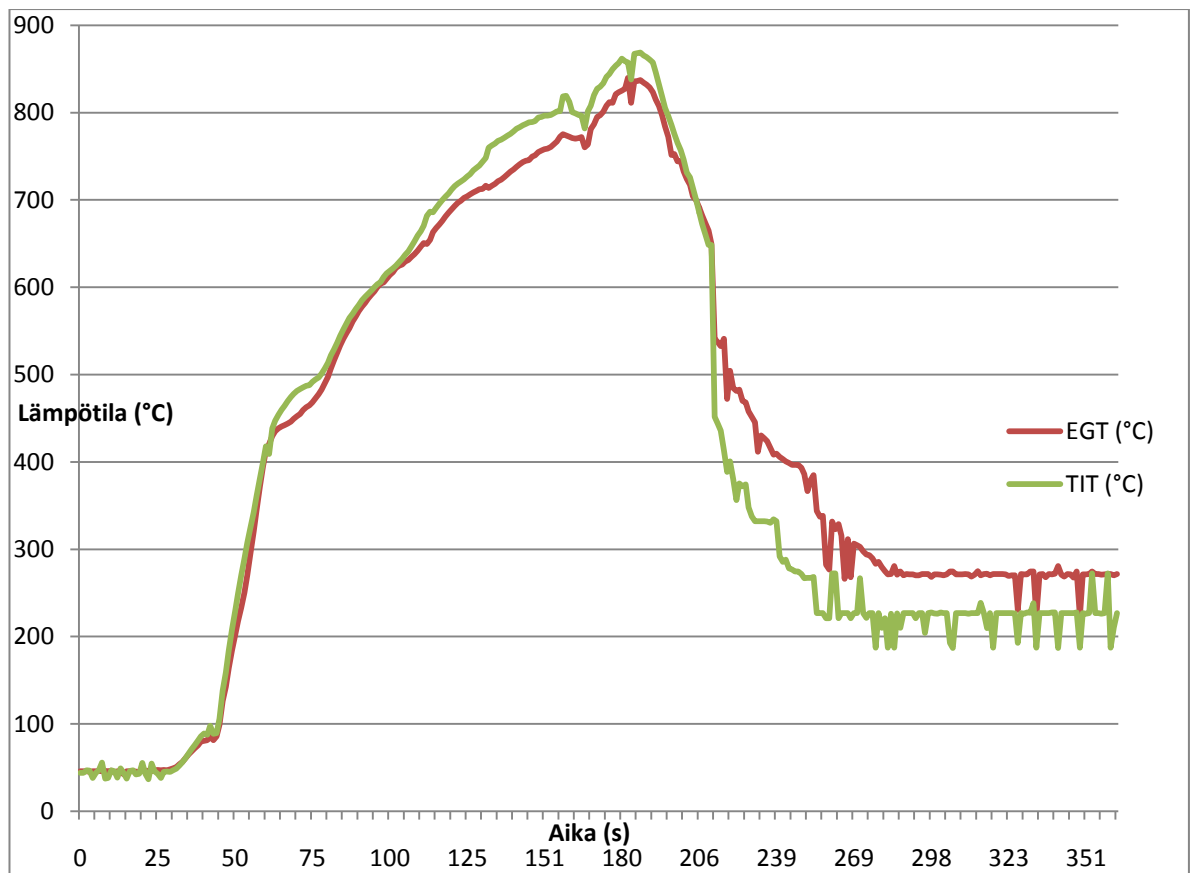
Kun oli varmistettu sytytys- ja öljyjärjestelmän toiminta, voitiin aloittaa suihkumoottorin testaus. Suihkumoottorin käynnistämiseksi vaadittiin seuraava toimintajärjestys:

1. Mittausdatan keräys päälle
2. Öljynkierron käynnistys
3. Sytytysjärjestelmä päälle
4. Turbo laitettiin pyörimään lehtipuhaltimella puhaltamalla ilmaa imuaukosta
5. Kaasua alettiin lisätä hitaasti
6. Otettiin lehtipuhallin hitaasti pois imuaukolta kun turbon ”vislaus” alkoi kuulua selkeästi. Tällöin suihkumoottori pysyy käynnissä itsenäisesti ilman sytytystä.

Suihkumoottori saatiin pyörimään omatoimisesti ensimmäisellä yrityksellä. Ensimmäisen ajon aikana lämpötilat nousivat noin 500 °C:een. Testi täytyi keskeyttää öljypumpun hajoamisen vuoksi. Lisäksi kaasuletku irtosi kaasun katkaisun jälkeen kuumentuneen suuttimen takia koska virtaava kaasu ei enää jäähdyttänyt sitä.

Toiseen testiin annoimme suihkumoottorin ja öljyn jäähtyä hetken aikaa. Vaihdoimme öljylinjaan varapumpun ja kiinnitimme kaasuletkun takaisin. Kun kaikki oli valmiina, aloitettiin toinen testi aikaisemmin mainitun toimintajärjestyksen mukaisesti. Suihkumoottori lähti jälleen käyntiin oletetusti ja saavutti itsenäisen toiminnan.

Suihkumoottorin kaasunvirtausta alettiin taas hitaasti nostaa. Kaasupullosta saatiin kaasua neljän baarin paineella mikä oli yläraja käytetyssä korkeapaineventtiilissä. Kaasunvirtausta säädettiin rengaspolttimen neulaventtiilillä. Testin loppuvaiheella suihkumoottoria päästiin ajamaan kaasuventtiili täysin auki. Tässä vaiheessa suihkumoottori testausalustoineen liikahti eteenpäin joka oli selvä merkki saavutetusta työntövoimasta. Testi lopetettiin suihkumoottorin oltua hetken aikaa täydellä teholla. Öljyn lämpötila saavutti ylärajan ja lämpötilat ennen turbiinia (TIT) ja pakokaasun lämpötila (EGT) nousivat yli tavoitteiden (kuvio 2).



Kuvio 2. Lämpötilakuvaaja suihkumoottorin onnistuneesta testistä.

Kuviossa 2 nähdään lämpötilan muutos ajan suhteen. 30 sekunnin kohdilla alettiin aukaista kaasuhanaa ja lämpötila lähti heti nousemaan. 60 sekunnin jälkeen lehtipuhallin otettiin pois ja jatkettiin kaasuhanan avaamista. Kaasua lisättiin tasaisesti kunnes venttiili oli täysin auki. Lämpötilan nousu jatkui tähän saakka noin 190 sekunnin kohdalle kun venttiili suljettiin. Tämän jälkeen aloitettiin välittömästi jäähdytys lehtipuhaltimella ja öljynkierron annettiin olla päällä. Lämpötilan lasku lehtipuhaltimen avulla jatkui 280 sekuntiin saakka, jonka jälkeen jäähdytys ja öljynkierto lopetettiin.

Täydellä teholla ajettaessa lämpötila ennen turbiinia oli odotetusti suurempi kuin pako-  
kaasun lämpötila. Lämpötilaero selittyy energian käyttämisestä ilman puristamiseen  
kompressorin siivillä, joita turbiini pyörittää. Suositellut lämpötilarajat 788 °C ennen  
turbiinia ja 650 °C turbiinin jälkeen, ylittyivät selvästi. Ennen turbiinia saavutettiin  
maksimissaan 869 °C ja turbiinin jälkeen maksimissaan 840 °C.

Turbon ahtopainetta ei mitattu, koska ensimmäisessä testissä pyrittiin testaamaan pel-  
kästään lämpötiloja ja kierrosnopeuksia. Mahdollisissa myöhemmissä testeissä olisi  
voitu testata myös ahtopaineita, mutta lämpötilatestit onnistuivat hyvin niin, niin ei pää-  
tetty enää tehdä uusia testejä.

Kierrosnopeuden mittausturboahtimelta epäonnistui mittauskohteesta johtuen. Turbon  
akselin päähän kiinnitettiin pultti jonka kannasta puolet värjättiin mustaksi ja puolet  
jätettiin kirkkaaksi. Musta kohta heijasti edelleen liikaa valoa, eikä optinen anturi onnis-  
tunut lukemaan pyörimisnopeutta. Mukana oli myös mustaa teippiä, joka ei kuitenkaan  
pysynyt paikoillaan. Tulevia testejä varten pitäisi puolet pultin päästä maalata mustalla  
mattavärillä.

## 6 Parannusehdotukset

Maksimityöntövoimaa rajoittaa pakokaasun lämpötila ennen turbiinia, 788 °C. Koska suihkumoottorin suunnittelulle ei ole olemassa tarkkoja ohjeita, sillä ei lähtötilanteessa välttämättä päästä niin korkeisiin lämpötiloihin. Alla on esitetty tapoja lisätä suihkuturbiinimoottorin työntövoimaa ja hyötysuhdetta. Osa esitetyistä tavoista on tarkoitettu aksiaalisella periaatteella toimiviin suihkumoottoreihin tai ne ovat kustannuksiltaan liian suuria ratkaisuja ja täten ne eivät ole sovellettavissa turboahdin-pohjaiselle rakenteelle.

### 6.1 Vesisuihkutus

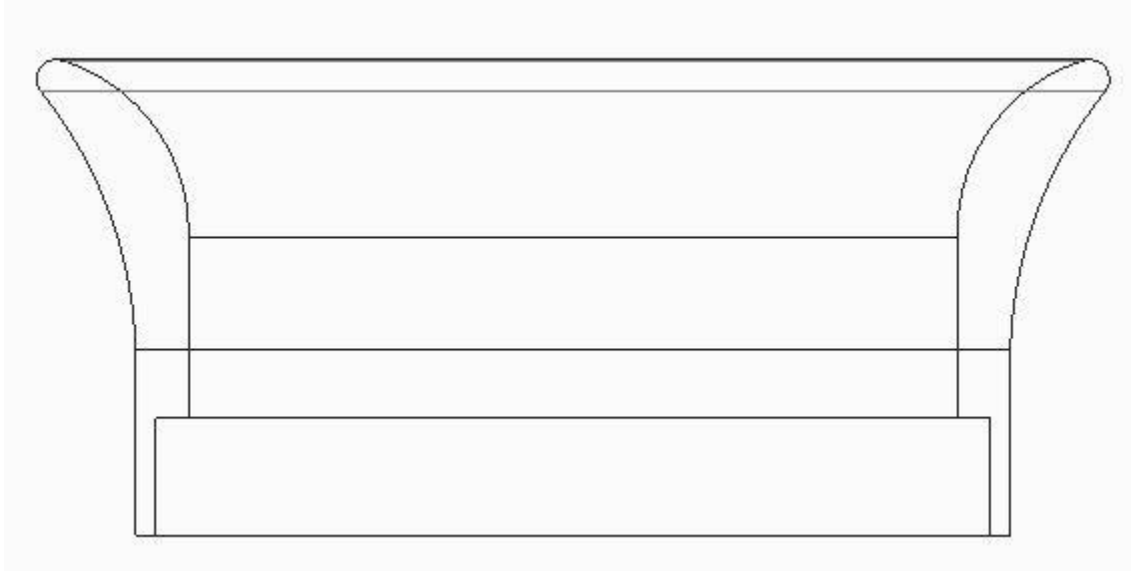
Työntövoimaa voi lisätä ruiskuttamalla kylmää vettä ilmapvirtaan ennen palokammiota. Kun vesi höyrystyy, se viilentää virtaavan ilman lämpötilaa nostaen tiheyttä. Tiheyden nostaminen lisää massavirtaa ja täten työntövoimaa. Lisäksi se antaa mahdollisuuden ahtaa lisä-ilmaa prosessiin, nostaen painetta, joka näkyy työntövoiman lisäyksenä. Vesiruiskutuksella saavutetaan 10 % - 30 % työntövoiman nousu. Koska ruiskutettava jäähdytysvesi tukahduttaa osan palokammiossa tapahtuvasta liekistä ja osa ruiskutetusta polttoaineesta ei syty, muodostuu pakoilmaan mustaa, paksua savua. Muodostunut savu on päästöllisesti haitallista, mikä on johtanut vesisuihkutuksen poistumiseen kaupallisesta käytöstä kokonaan. (Hünecke 2012, 182 - 183.)

### 6.2 Kellomainen ilmanotto

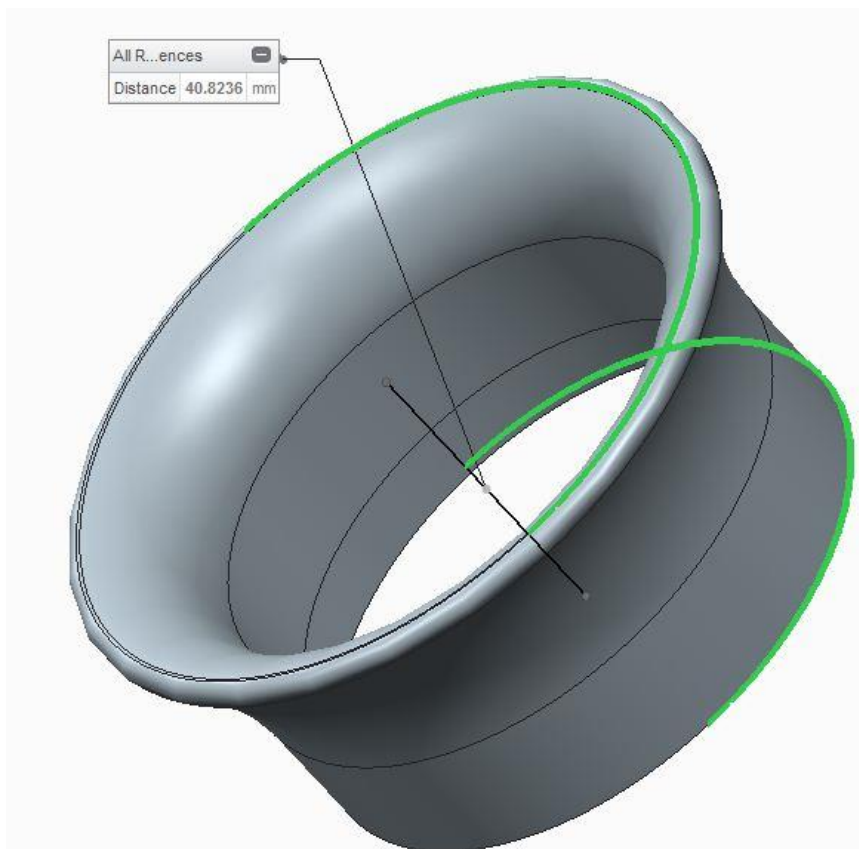
Optimaalisen ilmanoton takaamiseksi turbon imupuolen aukolle voidaan asentaa niin sanottu kellomainen ilmanotto. Kellomainen ilmanotto tarkoittaa trumpetin pään kaltaisesti muotoiltua, ulospäin laajenevaa ja pyöristettyä kellomaista suppiloa. Tällaisella geometrialla ilmanvastus saadaan hyvin pieneksi.

Kaupallisessa käytössä kellomaista ilmanottoa käytetään lähinnä koekäytössä, kun moottorin työntövoimaa ja polttoaineenkulutusta määritellään. Kyseinen muoto ei ole

optimaalinen kaupallisissa tarkoituksissa käytettävissä suihkumootoreissa sen lentoa haittaavien aerodynaamisten syiden takia. Staattisissa testeissä kyseinen sovellus on kuitenkin toimiva. (Koivisto & Jokinen 2008, 98; Blair & Cahoon 2006.)



Kuva 40. Kellomaisen ilmanoton geometria



Kuva 41. Kellomainen ilmanotto 3D-mallina.

NACA tutki 50-luvulla kellomaisen ilmanoton yhteydessä myös ilmanottoaukon pidentämistä. Ilmanottoaukon pidentäminen putkella lisäsi sisään virtaavan ilman nopeutta, muttei sillä ollut vaikutusta ulosvirtaavan ilman nopeuteen eikä se vaikuttanut huomattavasti paineisiin tai pakokaasun lämpötiloihin. (Lubick, Chelko & Wallner 1956, 1)

### **6.3 Korkeapainepumppu**

Korkeapainepumpuilla pystytään ruiskuttamaan enemmän polttoainetta palokammioon. Tämä lisäisi kaasun lämpötilaa mikä nostaisi kaasun nopeutta turbiini-osiossa. Lisääntyneen turbiinin pyörimisnopeuden avulla moottorin massavirta ja täten työntövoima lisääntyisivät. Polttoaineen ruiskutus korkeammalla paineella lisäisi polttoaineen atomisointia, eli pienentäisi yksittäisen syntyvän polttoainepisaran kokoa huomattavasti. Pienentynyt pisarakoko altistaa polttoaineen suuremmalle kontaktille hapen kanssa, mikä näkyy puhtaampana sekä tehokkaampana palamisena. (Hago Manufacturing Co 2012; Delavan 2000.)

### **6.4 Ohivirtaus**

Myös ohivirtauksen tuottaminen pakoilman ympärille lisäisi suihkumoottorin tuottamaa työntövoimaa, mutta tällä kyseisellä rakenteella sen saaminen on turbon geometrian, ja käyttökohteen takia hieman vaikeaa.

Ohivirtaus on työntövoiman lisäystä kasvattamalla moottorin läpi menevän ilman massavirtaa. Se toteutetaan ohjaamalla osa sisäänvirranneesta ilmasta turbiini-kompressorin rakenteen ohi puhallinkanavaan. Kasvaneen massavirran avulla saavutetaan huomattava työntövoiman lisäys polttoaineen kulutuksen pysyessä samana. Moderneissa moottoreissa ohivirtauksen muodostaa ensimmäinen suurikokoinen pyörivä siipiryhmä joka on liitetty ahtimeen ja sen kautta suihkumoottoriasetelmaan. (Benson 2010.)



## 7 Pohdinta

### 7.1 Työn eteneminen

Työn päätoimisena tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa toimiva Turbojet-mallinen suihkumoottori. Idean ja pääpiirteittäiset ohjeet saimme netin erinäisistä suihkumoottori-harrastelijapiireistä. Syvempi ymmärrys suunnitteluun, valmistukseen sekä osien toimintaperiaatteisiin kuitenkin luotiin ja kartoitettiin omatoimisella informaation ja kirjallisuuden keräämisellä sekä opiskelulla.

Työ teoreettisen osuuden kirjoittaminen aloitettiin tammikuussa 2014 keräämällä lähteaineistoa ja ideoita internetistä ja kirjoista. Hyödylliseksi suuntaa antavaksi tietolähteeksi osoittautui Yahoo palvelussa toiminut tee-se-itse suihkumoottorirakentajien keskusteluryhmä; DIY Turbojet Engine Group, jossa harrastelijat keskustelevat ja toteuttavat projektimme kaltaisia moottoreita. Myös Amerikan Yhdysvaltojen entisen ilmailulaitoksen NACA:n 50- ja 60-luvulla suorittamat tutkielmat, joiden salassapitovelvollisuudet olivat päättyneet, loivat laajempaa käsitystä erilaisista tavoista parantaa suihkumoottorin toimintaa. Moottorin osat suunniteltiin valmistusta varten huhtikuussa, ja niiden oletettiin saapuvan erään opintomatkan kuluessa, mutta osien valmistus viivästyi ja täten koko senhetkinen suunniteltu aikataulu menetti merkityksensä. Osat päästiin koamaan vasta kesäkuun alkuviiakoilla, kaksi viikkoa ennen ehdotonta viimeistä palautuspäivää.

Projektissa koettiin onnistuneen todella hyvin, sillä jo ensimmäisellä testauskerralla moottori kävi vakaasti tyhjäkäynnillä sekä sitä pystyttiin ajamaan täydellä kaasulla ilman flameout-ilmiötä. Flameout on suihkumoottoreille ominainen tilanne jossa moottorin sammuu äkillisesti esimerkiksi polttoaineen katkoksesta tai hapenpuutteen johdosta. Tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa toimiva Turbojet-suihkumoottori ja tavoitteet täyttyivät sillä moottori toimi niin kuin pitikin ja rajoina pidetyt lämpötilat ylitettiin rikkomatta turboahdinta. Vertailukohteena voidaan pitää internetistä löydettyjä vastaavanlaisia moottoreita, jotka ovat tarvinneet parantelua ja muutoksia saavuttaakseen edes vakaan tyhjäkäynnin. Valmistettua moottoria voidaan pitää eräänlaisen prototyypinä ja siksi tulevaisuutta varten onkin hyvä tehdä päivityksiä sen osiin.

## 7.2 Kehitysideat

Toimivasta ja onnistuneesta projektista huolimatta, siitä ei tullut täysin halutunlainen. Käytössä olleiden resurssien takia jouduttiin karsimaan ja muuttamaan alkuperäisiä suunnitelmia, kuten mm. polttoaineen vaihdos dieselpolttoaineesta propaaniin sekä auton polttoainepumpun käyttäminen öljyn pumppaamiseen.

Jotta moottoria voitaisiin jatkossa käyttää turvallisesti ja yhtäjaksoisesti pitempiä ajanjaksoja, ovat seuraavat päivitykset ehdottomia; Propanikaasun syöttöletku olisi hyvä vaihtaa lämpöä kestäväään letkuun tai putkeen sekä eristää kaasusuuttimen ja letkun suora kontakti esim. erillisellä liittimellä. Öljyjärjestelmä tarvitsee öljyä viilentävän, tehokkaan öljynjäähdyttimen sekä asiallisen säiliöinnin. Kaikki öljyletkut tulee vaihtaa hyvän lämmönkeston omaaviin teräspunosletkuihin. Anturointi ja sytytysjärjestelmä tulee koteloida sekä niille pitää valmistaa omat mikropiirinsä. Propanisuutin on vaihdettava huolellisesti suunniteltuun ja koneistettuun versioon.

Moottorin suorituskyvyn kannalta parannuksia voidaan tehdä vaihtamalla propaani dieselpolttoaineeseen. Kuten aiemmin raportissa on mainittu, tarvitsee dieselpohjainen ratkaisu toimiakseen pumpun joka kykenee vähintään 7 baarin pumppauspaineeseen. Tässä täytyy muistaa että moinen pumppu tarvitsee toimiakseen erillisen sitä pyörittävän voimanlähteen, kuten oikosulkumoottorin. Molemmat komponentit voivat olla varsin hintavia ja siksi ne ovatkin iso osa dieselpohjaisen ratkaisun kokonaiskustannuksista.

## 7.3 Ammatillinen kasvaminen työn edetessä

Projekti oli todella mielenkiintoinen ja kiinnostus sitä kohtaan säilyi hyvänä loppuun asti. Suihkumoottorit olivat ennalta tuntematon aihe molemmille ja siihen sekä sen lisälaitteisiin liittyvät haasteet moninaisia. Opintomatkojen, opintojen vaatiman huomion ja ruostumattomien osien viivästyneen toimituksen takia menetettiin noin 160 työtuntia. Tästä aiheutunut tiukka deadline pakotti organisoimaan ja hallinnoimaan ajankäyttöä sekä työjärjestyksiä. Samalla se opetti ja valmensi kohtamaan työelämässä mahdollisesti eteen tulevia, oman kontrollin ulottumattomissa sattuvia viivästyksiä, muutoksia ja takapakkeja. Suunnitteluun liittyen saatiin muistutus siitä kuinka hyödyllistä ja tärkeää on mallintaa ja suunnitella toteutettava kohde valmiiksi paperille sekä virtuaalisesti, samal-

la huomioiden käytössä olevat jälkityöstömahdollisuudet. Haastavan projektin toteuttaminen lisäsi ammatillista itseluottamustamme ja loi varmuutta ottaa vastaan vaikeitakin haasteita ja tehtäviä.

## Lähteet

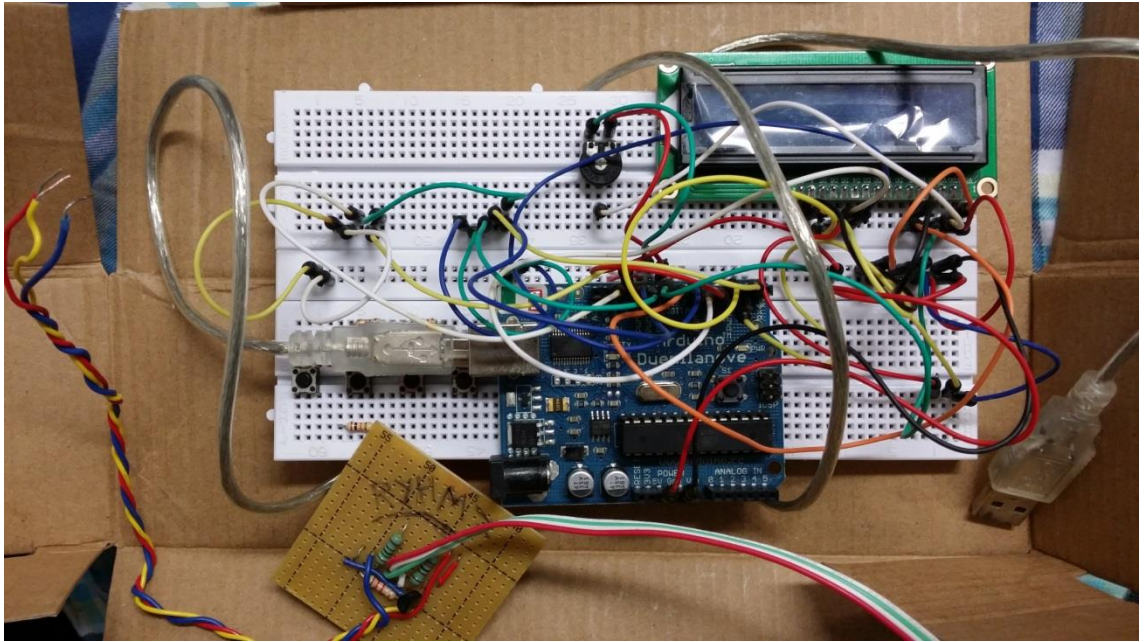
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.  
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. Katsottu 14.4.2014.
- Benson, T. 2010a. General thrust Equation. NASA.  
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/thrsteq.html>. Katsottu 16.5.2014.
- Benson, T. 2010b. Turbofan engine. NASA.  
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/aturbf.html>. Katsottu 11.3.2014.
- Blair, G.P. & Cahoon, W.M. 2006. Special Investigation: Desing of an intake bellmouth. NSX Prime.  
[http://www.nsxprime.com/w/images/9/9e/%28Blair\\_and\\_Cahoon%29\\_Design\\_of\\_an\\_intake\\_bellmouth\\_Sept.\\_2006.pdf](http://www.nsxprime.com/w/images/9/9e/%28Blair_and_Cahoon%29_Design_of_an_intake_bellmouth_Sept._2006.pdf). Katsottu 8.4.2014.
- BorgWarner. 2014. Turbocharger Bearing System.  
<http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerBearingSystem.aspx>. Katsottu 17.5.2014.
- Datasheet Reference. 2014. Project: Ignition Coil Driver with 2N3055 Transistor and 555 IC. <http://datasheetreference.com/component/content/article/16/87-ignition-coil-driver.html>. Katsottu 17.3.2014.
- Delavan. 2000. A total look at oil burner nozzles.  
[http://www.delavaninc.com/pdf/total\\_look.pdf](http://www.delavaninc.com/pdf/total_look.pdf). Katsottu 13.05.2014.
- Goel, T. 2013. Calculating the stoichiometric Air-Fuel Ratio. Bright Hub Engineering.  
<http://www.brighthubengineering.com/machine-design/15235-the-stoichiometric-air-fuel-ratio/>. Katsottu 22.5.2014.
- Google maps. 2014. Kuva potentiaalisesta testauspaikasta.  
<https://www.google.fi/maps/@62.6403916,29.849921,1735m/data=!3m1!1e3>. Katsottu 20.4.2014.
- Hago Manufacturing Co. 2012. Fuel nozzle.  
<http://na.heating.danfoss.com/PCMPDF/VFDZB122.pdf>. Katsottu 13.04.2014.
- Holset Turbochargers. 2014. Model Information.  
[http://www.myholsetturbo.com/images/holset\\_compressor\\_map.jpg](http://www.myholsetturbo.com/images/holset_compressor_map.jpg). Katsottu 8.5.2014.
- Hünecke, K. 2012. Jet Engines, Fundamentals of theory, desing and operation. Airlife.
- HybridZ. 2007. The Holset turbo FAQ.  
<http://forums.hybridz.org/topic/51273-the-holset-turbo-faq/>. Katsottu 8.5.2014.
- Hämäläinen, R. 2003. Turboahtaminen. Fin-Tuning.Net. <http://fin-tuning.net/FTBB/index.php?page=2;wap2>. Katsottu 14.5.2014.
- Jääskeläinen, H & Khair, M.K. 2010. Combustion in Diesel Engines. Dieselnet.  
[https://www.dieselnet.com/tech/diesel\\_comb.php](https://www.dieselnet.com/tech/diesel_comb.php). Katsottu 8.5.2014.
- Koivisto, R. & Jokinen, J. 2008. Suihkumoottorit, Opetushallitus.
- Lubick, R. J., Chelko, L. J. & Wallner, L. E. 1956. Effect of inlet-duct length in uniform-flow field on turbojet-engine operation. Washington. NACA.
- Mauno, E. 1998. Uusi Moottoritekniikka. Virittäminen ja Säättäminen. Helsinki. Alfa-mer Oy.
- Neste Oil. 2014. Tuotetiedote Lentopetroli Jet A-1.  
[http://www.neste.fi/doc/145163\\_fi.pdf](http://www.neste.fi/doc/145163_fi.pdf). Katsottu 14.4.2014.

Shelly, J. 2014. JetSpecsTM. <http://www.nuclearprojects.com/jetspecs/>. Katsottu 13.5.2014.

Teknologiateollisuus. 2007. Polttoaineiden teholliset lämpöarvot. [http://www.teknologiateollisuus.fi/file/1726/Polttoaineidentehollisetlampoarvot\\_07.pdf.html](http://www.teknologiateollisuus.fi/file/1726/Polttoaineidentehollisetlampoarvot_07.pdf.html). Katsottu 14.3.2014.

Työturvallisuuskeskus. 2014. Riskienarvionti. <http://www.ttk.fi/riskienarviointi>. Katsottu 7.5.2014.

## Koottu Arduino-järjestelmä antureille



**Riskienarviointilomake**

<b>Vaaratilanteen kuvaus</b>	<b>Riski</b>	<b>Toimenpiteet</b>	<b>Vastuuhenkilö</b>	<b>Aikataulu</b>	<b>Ok</b>
<b>RAKENNUSVAIHE</b>					
Kipinät polttavat ihoa tai vaatteita hitsatessa tai hiottaessa metallia	2	Käytetään suojavaatteita	J.K & T.T		
Joku polttaa kätensä kuumaan metalliin	3	Käytetään suojahanskoja	J.K & T.T		
Raskas metallikappale tippuu jalalle tai sormien päälle	2	Ei nosteta yksin raskaita kappaleita	J.K & T.T		
Hitsaushuurut aiheuttavat pyörtyymiä	1	Käytetään hitsaustilassa imureita poistamaan haitallinen ilma	J.K & T.T		
Joku sokeutuu hitsausta katsoessa	3	Ulkopuoliset poistetaan tilasta ja tilassa olevat käyttävät maskeja	J.K & T.T		
Kova melu hiomisesta	2	Kuulosuojaimet tilassa ollessa	J.K & T.T		
<b>TESTAUSVAIHE</b>			J.K & T.T		
Turbo räjähtää	4	Turbon ympärille rakennetaan suoja. Seistään turbon sivulla	J.K & T.T		
Kuuma öljy iholle	3	Suojavaatteet päällä testauksen ajan. Hyvät letkuliitokset	J.K & T.T		
Joku polttaa kätensä kuumaan metalliin	3	Suojahanskat testauksen ajan. Liikuttaminen vain kehikosta	J.K & T.T		
Sähköisku sytytyksestä	1	Laitteeseen ei kosketa virran ollessa kytkettynä	J.K & T.T		
Polttoainehuurujen ja palo-kaasujen hengitys	2	Vältetään menemästä pakopuolen ja nestesäiliöiden läheisyyteen	J.K & T.T		

**Riskienarviointilomake**

Suihkumoottori karkaa kä- sistä	1	Tehdään tarpeeksi raskas rakenne ja kiinnitetään kehikko tukevasti	J.K & T.T		
Rakennelma tippuu jaloille siirrettäessä	2	Tehdään kantokahvat niin, että rakennelma ei kulje jalkojen päällä	J.K & T.T		
Kova meteli suihkumootto- rista	3	Kuulosuojaimet pääs- sä testauksen ajan	J.K & T.T		
Letku rikkoutuu kovasta paineesta	2	Ylimoitetaan letkut ja liitokset	J.K & T.T		

**Todennäköisyys****Seuraukset**

	Vähäiset	Haitalliset	Vakavat
Epätodennäköinen	<b>1 Merkityksetön riski</b>	<b>2 Vähäinen riski</b>	<b>3 Kohtalainen riski</b>
Mahdollinen	<b>2 Vähäinen riski</b>	<b>3 Kohtalainen riski</b>	<b>4 Merkittävä riski</b>
Todennäköinen	<b>3 Kohtalainen riski</b>	<b>4 Merkittävä riski</b>	<b>5 Sietämätön riski</b>